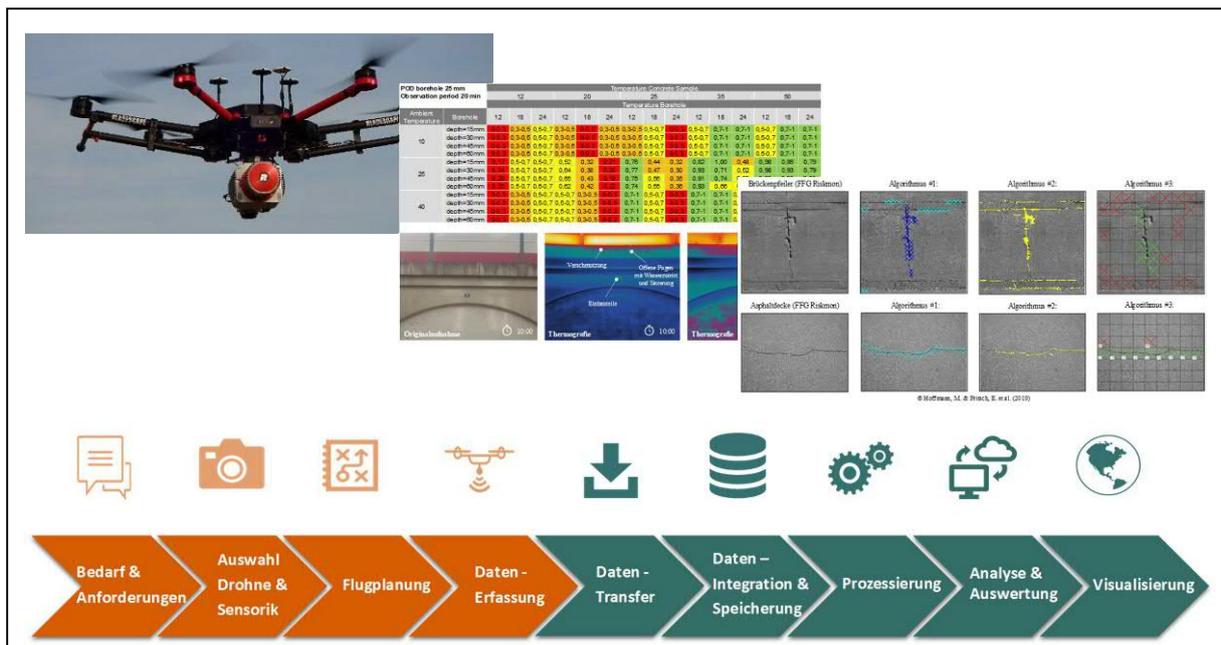


RISKMON

Anlageninspektion und RISK-MONitoring mit Hochleistungs- drohnen (UAS/UAV)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2016
(VIF2016)

Dezember 2019



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A – 1030 Wien

 Bundesministerium
Verkehr, Innovation
und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Nordbahnstraße 50
A – 1020 Wien

 **ÖBB**
INFRA

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A – 1010 Wien

 **ASFiNAG**

Für den Inhalt verantwortlich:

ARGE RISKMON

BLADESCAPE - Airborne Services GmbH
2320 Schwechat, Concorde Business Park 2/F,

BOKU - Institut für konstruktiven Ingenieurbau (IKI)
1190 Wien, Peter-Jordan-Straße 82

IQSOFT - Gesellschaft für Informationsverarbeitung m.b.H -
1120 Wien; Schönbrunnerstr. 218

 **BLADESCAPE**
 **BOKU** Institut für konstruktiven
Ingenieurbau (IKI) 
 **IQSOFT**

Programmmanagement:
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien

 **FFG**
Forschung wirkt.

RISKMON

Anlageninspektion und RISK-MONitoring mit Hochleistungs- drohnen (UAS/UAV)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF2016)

AutorInnen:

Priv.-Doz. DI. Dr. techn. Markus HOFFMANN

GF. Ing. Thomas DOLLESCHAL

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Alfred STRAUSS

unter Mitwirkung von

Gerhard PELLER, Florian ROTH, Philipp STERLICH, Lisa RIEDEL (BLADESCAPE)

Lisa MOLD, Mathias AUER, Valentin DONEV (BOKU – IKI)

Ernst RIEDL, Rinaldo WURGLITSCH, Nizar AOURIK, Gregor PETROWSKI (IQSOFT)

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

BLADESCAPE - Airborne Services GmbH

BOKU - Institut für konstruktiven Ingenieurbau (IKI)

IQSOFT - Gesellschaft für Informationsverarbeitung m.b.H

Vorwort

In entwickelten Industrie- und Dienstleistungsgesellschaften hat sich der Schwerpunkt der Investitionen zunehmend von Neu- und Ausbau in Richtung Betrieb und Instandsetzung der hochrangigen Verkehrsnetze verlagert. Anlassbezogene Interventionen waren in der Aufbauphase vielfach ausreichend, greifen aber mit zunehmender Alterung sowie Ausfällen im Anlagenbestand zu kurz. Daher wurden bestehende Karteikartensysteme zwischen 1970 bis 1990 sukzessive durch Datenbanken mit Anlagenbestand und Zustandsdaten aus periodischen Erfassungen abgelöst. Die Zustandsprognose, Maßnahmenplanung, Bauprogramm und Budgetierung sowie Umsetzung und Qualitätssicherung erfolgt bis heute überwiegend erfahrungsbasiert durch Ingenieure. Im Bereich Oberbau wurden zudem seit ein bis zwei Jahrzehnten Softwaretools eingesetzt, die einen Teil dieser Aufgaben auf Basis stark vereinfachter Ansätze übernahmen. Zudem gab es in den letzten Jahren starke Bestrebungen der Infrastrukturbetreiber diese Ansätze im Rahmen von Asset Management Systemen auf alle relevanten Anlagen auszuweiten¹.

Die technologische Entwicklung und zunehmende Vernetzung sowie Beschleunigung von Standorten, Märkten und Dienstleistungen der letzten Jahre haben weder vor den Verkehrsteilnehmern, noch der Verkehrsinfrastruktur Halt gemacht. Für Verkehrsteilnehmer bestehen bereits eine Reihe von Dienstleistungen mit echtem Mehrwert auf Basis von Echtzeitdaten wie z.B. Routenplanung, Stau-, Unfall- und Umfeldinformationen. Die zunehmende Urbanisierung sowie gestiegenen Ansprüche in Bezug auf Bequemlichkeit, Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit definieren dabei das Marktumfeld der Zukunft. In Planung und Bau moderner Verkehrsinfrastrukturen hat die Digitalisierung unter Einsatz moderner Sensorik ebenfalls Einzug gehalten (BIM). Die periodische Zustandserfassung von Oberbau und Strecke mittels schnellfahrender Messsysteme ist am hochrangigen Straßen- und Schienennetz mittlerweile Standard. Die automatisierte Auswertung nach Schadensmerkmalen ist dagegen bei vielen Anbietern nur teilweise realisiert (z.B. Spurrinnen, Schienenbruch) und erfordert oft noch einen manuellen Eingriff (z.B. Einzel- und Netzrisse). Die messtechnische Bestands- und Zustandserfassung von Bauwerken, Naturgefahren und Streckenumfeld stellen zudem eine noch großteils ungelöste Herausforderung dar. Dasselbe gilt für die Aufklärung und Gefahrenabwehr bei außergewöhnlichen Ereignissen sowie die Analyse und Integration der sich daraus ergebenden Daten und Informationen in die Bestandsysteme und Prozesse der Betreiber.

Der technische Stand von Hochleistungsdrohnen und -sensoren sowie die Möglichkeiten und Entwicklungen in der Analyse großer Datenmengen mittels intelligenter Algorithmen gelten zurzeit als wesentliche Zukunftsfelder, die einen Beitrag dazu leisten können. Wie bei jeder neuen Technologie werden jedoch zum Teil Erwartungen geweckt, die einer realistischen Betrachtung nur begrenzt standhalten bzw. nur von hochprofessionellen Anbietern erfüllbar sind. So werden UAV-Leistungen zwar bereits vielfach zur Anfertigung von Bildern, Videos sowie der Erstellung einfacher 3D – Modelle am Markt angeboten. Die hochauflösende Erfassung von Bauwerken der Verkehrsinfrastruktur z.B. mittels Fotogrammetrie, Laserscan, Thermografie und Multispektralanalyse geht allein aufgrund des Aufwands für Einsatzplanung und Sensorik aber wesentlich weiter und bedarf entsprechender Expertise, um die notwendige Qualität und Nachhaltigkeit zu gewährleisten. Die Prozessierung der anfallenden Datenmengen zur Schadensbegutachtung (digitaler Zwilling) erfordert zudem bereits für einfache Bauwerke mehrere Tage Rechenzeit, wobei die

¹ vgl. *HOFFMANN, M. (2018)*

Anforderungen exponentiell mit der Auflösung steigen. Diese ist jedoch wesentliche Voraussetzung für die (teil-)automatisierte Schadenserkenkung und Auswertung mit entsprechenden Algorithmen für jeden Schadenstyp.

Algorithmen zur Auswertung von Veränderungen erlauben eine schnelle Detektion als Basis für die Beurteilung und erfordern mindestens zwei Erfassungen. Sie werden seit Jahren erfolgreich z.B. in der Analyse von Anlandung und Erosion anhand bathymetrischer Aufnahmen (Multibeam) eingesetzt². Weiters erlauben sie eine schnelle Detektion größerer Änderungen an Bestandsstrecken von Straße und Schiene (z.B. Rutschungen) sowie bei Naturgefahren (Vermurung, Lawinhänge). Die automatisierte Schadensdetektion an Bauwerken stellt dagegen allein schon aufgrund der unterschiedlichen Baumaterialien eine Herausforderung dar und benötigt je nach Aufnahmetechnik ein entsprechendes Preprocessing vor der eigentlichen Analyse (Kantendetektion, Abwicklung/Orthoplane, Schattenentfernung etc.). Die Detektion der tatsächlichen Schäden erfordert je nach Aufnahmetechnik geeignete Algorithmen, deren Umsetzung erheblichen Aufwand verlangt und die weitgehend nicht kommerziell verfügbar sind. Für die nahe Zukunft ist jedoch zu erwarten, dass entsprechende Algorithmen für alle Schadensmerkmale bei entsprechender Investition verfügbar sein werden. Die zentrale Frage für die Beurteilung und Zustandsprognosen wird dann deren Zuverlässigkeit bzw. ihre Detektionsrate und Überprüfung anhand ausgewählter Beispieldatenbanken und geeigneter Laborversuche darstellen.

Erfolgt eine Umsetzung der beschriebenen Erfassung und Auswertung, liegen dem Betreiber qualitativ hochwertige 3D – Modelle und quantitative flächige bzw. räumliche Zustandsdaten der Anlagen vor. Mit der technischen Entwicklung und Standardisierung werden diese Erfassungen und Auswertungen sowie der Einsatz stationärer Sensorik und Monitoringsysteme zunehmend günstiger und damit auf Netzebene skalierbar sein. Abgesehen von der höheren Datenqualität entstehen den Infrastrukturbetreibern in der Implementierungsphase jedoch Mehrkosten und sind nur in ausgewählten Anwendungsbereichen direkte relevante Einsparungen erwartbar. Ein die Kosten weit übersteigender Mehrwert ist vor allem dann erzielbar, wenn diese Daten zu besseren Prognosen, erhöhter Verfügbarkeit und effizienteren Investitionsentscheidungen im Lebenszyklus führen. Wie umfassende Analysen zeigen, sind die Bestandssysteme der Betreiber ohne Adaption und Weiterentwicklung derzeit noch nicht geeignet, diesen Mehrwert zu generieren. Vor diesem Hintergrund ist es daher über das Thema Erfassung und Auswertung hinaus wesentlich, die sich daraus ergebenden Anforderungen und Prozesse in den Bestandssystemen schrittweise anzupassen.

Die derzeit für das Asset Management kommerziell verfügbaren Softwaretools basieren auf stark vereinfachten methodischen Ansätzen, aggregierten Zustandsdaten und listenartigen Datenbanksystemen begrenzter Kapazität. Dasselbe gilt auch weitgehend für die bei den Betreibern vorhandenen bzw. adaptierten Lösungen. Bei entsprechender Vereinfachung bzw. Erweiterung sind die Ergebnisse der beschriebenen Erfassung und Auswertung grundsätzlich rasch integrierbar. Diese Vereinfachungen führen jedoch nachweisbar zu substantiellen methodischen und ergebnisrelevanten Problemen. Zudem geht dadurch die mit entsprechendem Aufwand erzielte Datenqualität messtechnischer Erfassungen bis zur Optimierung und Entscheidungsfindung weitgehend verloren. Bei moderneren Ansätzen in Asset Management und Lebenszykluskostenanalyse können diese Einschränkungen jedoch weitgehend vermieden und deutlich höhere substantielle Effizienzgewinne erzielt werden. Das Forschungsprojekt RISKMON leistet einen wesentlichen Beitrag zur messtechnischen Bestands- und Zustandserfassung von Bauwerken, Naturgefahren, Streckenumfeld sowie außergewöhnlichen Ereignissen sowie der möglichen Integration der Ergebnisse in die

² vgl. HASELBAUER, K. (2015); HOFFMANN, M. et al. (2018)

Bestandssysteme. Der hochprofessionelle Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugsystemen inklusive dem entsprechenden Datenmanagement hat jedenfalls mit einer Vielzahl von Anwendungsbereichen enormes Potenzial die Bewirtschaftung von Infrastruktureinrichtungen effizienter und sicherer zu gestalten.

Projektstruktur und Projektteam RISKMON

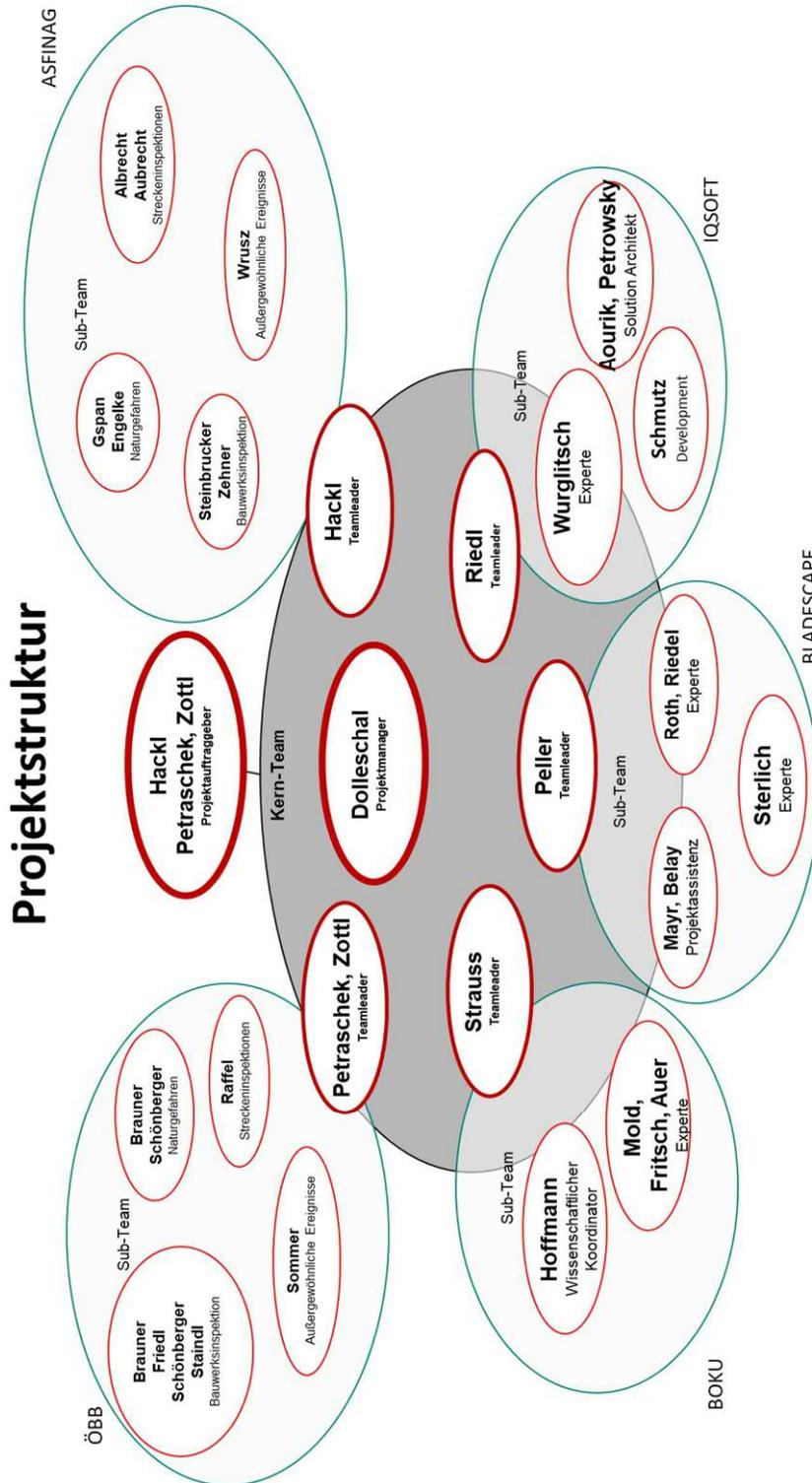


Abbildung 1: Projektstruktur

Zusammenfassung

Die VIF2016 - Ausschreibung zu mobiler Sensorik im Infrastrukturbereich wurde von dem Konsortium BLADESCAPE, BOKU-IKI und IQSOFT mit dem Antrag „Anlageninspektion und RISK-MONitoring mit Hochleistungsdrohnen (UAS/UAV)“ gewonnen. Das Forschungsprojekt weist eine Laufzeit von 24 Monaten auf und erbringt den Proof of Concept, Application, Efficiency and Integration für die angebotenen Leistungen. Konkret geht es im Forschungsprojekt RISKMON um die hochgenaue Erfassung und Inspektion von Bauwerken, Naturgefahren, Bestandsstrecken sowie Aufklärung und Gefahrenabwehr bei außergewöhnlichen Ereignissen unter Einsatz von Hochleistungsdrohnen und Sensorik. Neben der Potenzialanalyse ist die Umsetzung, teilautomatisierte Auswertung und Integration in die Prozesse bzw. die IT-Struktur und das Asset Management der Betreiber anhand konkreter Anwendungsfälle nachzuweisen. Aufbauend auf die Potenzialanalyse sind konkrete Empfehlungen für die Anwendung und Weiterentwicklung der Erfassungsprozesse gemeinsam mit den Betreibern auszuarbeiten.

Der Themenkomplex Inspektion beinhaltet eine Analyse der üblichen Prozesse in der Zustandserfassung von Bauwerken, Schutzbauten und Streckenabschnitten. Im Anwendungsbereich Bauwerke erfolgt die Konzeption, Umsetzung und Auswertung der Inspektionen für eine Stahlbrücke und eine Stahlbetonbrücke, eine Schutzverbauung und ein Gebäude. Im Anwendungsbereich Naturgefahren erfolgt die Erfassung und Auswertung einer Schüttmure sowie von Lawinhängen mit Messung von Schneemächtigkeit und Schneehöhe sowie Lawinsprengung unter UAV-Einsatz. Im Themenfeld Bestandsstrecken erfolgt die Erfassung und Auswertung mit Orthofoto sowie Änderungsdetektion und Auswertung für einen Streckenabschnitt von Straße (ASFINAG) und Schiene (ÖBB). Im Anwendungsbereich außergewöhnliche Ereignisse erfolgt eine Aufklärung an einer ausgewählten Teststellung, die Unterstützung bei einer Einsatzübung sowie Recherche der Möglichkeiten einer Gefahrenabwehr. Auf dieser Basis erfolgt eine umfassende Darstellung des bisherigen Standes von Technik und Wissenschaft sowie der konkreten methodischen Herangehensweise in den Anwendungsfeldern (Proof of Concept). Weiters die Auswertung der Ergebnisse aus der Anwendung (Proof of Application) sowie Gegenüberstellung mit bestehenden Ansätzen (Proof of Efficiency). Abgerundet wird das Bild durch die Beschreibung der Datenaufbereitung mit Schnittstellen, Metadaten und Integration der Datenlieferungen in die Bestandsysteme (Proof of Integration).

Wesentliche Ergebnisse des Forschungsprojektes RISKMON sind weiters eine Standardisierung der Anforderungen für den Einsatz von Hochleistungsdrohnen und Sensorik im Bereich der Verkehrsinfrastruktur. Weiters die Bestands- und Zustandserfassung mit Orthofotos, 3D - Modellen, Detektion von Änderungen und Auffälligkeiten bis hin zur beispielhaften Schadensdetektion von Rissen mittels Algorithmen. RISKMON beinhaltet darüber hinaus eine systematische Analyse der Einsatzmöglichkeiten berührungsloser Sensorik (Foto, Laserscan, Thermografie, Multispektralanalyse, Georadar) mit umfassenden Laborversuchen. Darauf aufbauend eine Validierung erkannter Schäden sowie Ableitung der optimalen Einsatzbedingungen nach Schadensmerkmal mit Erkennungswahrscheinlichkeit und Einsatzempfehlung. Im Bereich Naturgefahren die Entwicklung eines Simulationsmodells für Schneefallereignisse sowie eines Lebenszykluskostenmodells für den Vergleich von passiven und aktiven Schutzmaßnahmen mit präventivem Einsatz. Weiters die Konzeption eines Sensornetzwerkes für die Beobachtung von Lawinhängen mit Kostenschätzung. Aufbauend auf die verwendeten Softwaretools sowie der beispielhaften Integration in die Bestandssysteme der Betreiber sowie SWOT – Analyse werden abschließend Empfehlungen zur Weiterentwicklung und Standardisierung im Asset Management von ÖBB und ASFINAG gegeben.

Summary

The VIF2016 Call for Mobile Infrastructure Sensors was won by the consortium BLADESCAPE, BOKU-IKI and IQSOFT with the application "Plant Inspection and RISK Monitoring with High Performance Drones (UAS / UAV). The research project has a term of 24 months and provides the proof of concept, application, efficiency and integration for the services offered. Specifically, the RISKMON research project is concerned with the highly accurate recording and inspection of structures, natural hazards, existing routes, as well as information and hazard prevention in the event of extraordinary events using high-performance drones and sensors. In addition to the potential analysis, the implementation, semi-automated evaluation and integration into the processes as well as the IT structure and the asset management of the operators has to be proven on the basis of specific applications. Building on the potential analysis, concrete recommendations for the application and further development of the data collection and analysis processes are to be worked out together with the infrastructure operators ASFINAG and ÖBB.

The topic of inspection includes an analysis of the usual processes in the condition assessment of structures, protective structures and track sections. In the structure's application area, the design, implementation and evaluation of the inspections for a steel bridge and a reinforced concrete bridge, a protective enclosure and a building are carried out. In the area of natural hazards, the collection and evaluation of debris flow as well as avalanche slopes with measurement of snow height and snow thickness together with avalanche blasting under UAV use are carried out. In the field of existing tracks, the collection and evaluation with ortho-photo as well as change detection and evaluation for a stretch of road (ASFINAG) and rail (ÖBB) takes place. In the field of extraordinary events, a clarification of a selected test position, the support during an emergency exercise as well as research of the possibilities of protection are evaluated. On this basis, a comprehensive presentation of the current state of technology and science as well as the concrete methodological approach in the fields of application (proof of concept) is given. Furthermore, the evaluation of the results from the application (proof of application) as well as comparison with existing approaches (proof of efficiency) is provided. The picture is rounded off by the description of the data preparation with interfaces, metadata and integration of the data deliveries into the existing systems (proof of integration).

Essential results of the research project RISKMON are recommendations for a standardization of the requirements for the use of high-performance drones and sensors in the field of transport infrastructure. Furthermore, the inventory and condition survey with orthophotos, 3D models, detection of changes and abnormalities with exemplary damage detection of cracks using intelligent algorithms. RISKMON also includes a systematic analysis of the application possibilities of non-contact sensors (photo, laser scanning, thermography, multispectral analysis, georadar) with comprehensive laboratory tests. Building on this, a validation of detected damage as well as deduction of the optimal conditions of use according to the damage characteristic with recognition probability and application recommendation are given. In the area of natural hazards, a simulation model for snowfall events and a life-cycle cost model for the comparison of passive and active protective measures with preventive use was developed. Furthermore, the conception of a sensor network for the observation of avalanche slopes with cost estimation is provided. Based on the SWOT – Analysis and exemplary integration into the existing systems of the operators, recommendations for further development and standardization in the asset management systems of ÖBB and ASFINAG are given.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	15
1.1	Ausgangslage	15
1.2	Zielsetzung, Aufgaben und Abgrenzung	17
1.3	Vorgehen und Methodik	19
1.4	Workpackages und Zeitplan	24
1.5	Projektfortschritt und Budgetplan (Zwischenbericht).....	31
1.5.1	Die wesentlichen Projektanpassungen im Überblick	31
1.5.2	Arbeitspaket II - Analyse Erfassungsmethoden im Überblick.....	32
1.5.3	Arbeitspaket III – Konzeption Einsatz & Datenanalyse im Überblick.....	32
1.5.4	Arbeitspaket IV – Umsetzung der Anwendungsfälle im Überblick.....	33
1.5.5	Arbeitspaket V –Ergebnisevaluierung & Optimierung im Überblick	33
1.5.6	Arbeitspaket IV – Ergebnisaufbereitung und Bericht im Überblick	34
1.5.7	Projektzeitplan & Projektbudget	34
2	Stand Technik und Wissenschaft	37
2.1	Überblick Asset Management.....	37
2.2	Standards Zustandserfassung	42
2.2.1	Bauwerke.....	42
2.2.2	Naturgefahren.....	46
2.2.3	Streckenerfassung	51
2.2.4	Außergewöhnliche Ereignisse	52
2.3	Zustandserfassung mit unbemannten Luftfahrzeugsystemen	53
2.3.1	Einsatzbereiche	55
2.3.2	Anwendungsfälle und -potentiale im Bereich Infrastruktur.....	57
2.3.3	Sensortypen, Parameter und Kosten	58
2.3.4	Datenauswertung und Aufbereitung	66
2.3.5	Integration Asset Management.....	69
3	Datenverarbeitung und Integration	71
3.1	Datenbanken Asset Management	71
3.1.1	Datenverarbeitungskonzept.....	71
3.1.2	Datenbankkonzept	73
3.2	Sensoren und Datenformate.....	78
3.2.1	Sensoren	78
3.2.2	Datenformate	79
3.3	Erfassung und Prozessierung	81
3.3.1	Erfassung.....	81
3.3.2	Prozessierung.....	86

3.3.3	Visualisierung der Ergebnisse.....	96
3.4	Georeferenzierung	99
3.5	Tiles, Clipping und Layering.....	100
3.6	Punktwolke, Tin, Mesh, 3D – Objekte, Textur	102
3.7	Filterung, Editierung, Speicherung und Export.....	105
3.8	Vergleich Softwarelösungen	107
3.8.1	Räumliche Datenbanken mit linearer Referenzierung	107
3.8.2	Visualisierung	110
3.8.3	Prozessierung	110
3.9	Empfehlung und Integration IT - Bestandssysteme.....	111
3.9.1	Bestandssysteme der Betreiber (IST)	111
3.9.2	Weiterentwicklung Bestandssysteme	114
4	Laborversuche und Kalibration	121
4.1	Versuchskonzeption.....	121
4.2	Sensorbeschreibung	124
4.2.1	Sensorübersicht und Vorauswahl.....	124
4.2.2	Infrarotkamera.....	126
4.2.3	Hyperspektralkamera.....	128
4.2.4	Georadar	129
4.3	Versuchsdurchführung	130
4.3.1	Übersicht Versuchsprogramme	130
4.3.2	Thermografie Versuchsprogramm I	130
4.3.3	Thermografie Versuchsprogramm II.....	134
4.3.4	Thermografie Versuchsprogramm III	136
4.3.5	Georadar Plattenversuche	138
4.3.6	Hyperspektralanalysen	140
4.4	Detektionswahrscheinlichkeiten und Eignung Messsysteme.....	143
4.4.1	Detektionswahrscheinlichkeit der Thermografie	143
4.4.2	Detektionswahrscheinlichkeit zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden.....	145
4.5	Ergebnisse und Empfehlungen	147
4.5.1	Detektion von Schäden und Schadensbildern mittels Thermografie	147
4.5.2	Georadar	147
4.5.3	Hyperspektralanalysen	148
4.5.4	Zusammenfassung.....	149
4.5.5	Ausblick.....	152
5	Zustandserfassung Bauwerke	153
5.1	Konzeption Zustandserfassung.....	153
5.2	Auswahl Einsatzgebiet.....	156

5.2.1	Ziel der Auswahl	156
5.2.2	Brainstorming-Workshops	156
5.2.3	Expertenbefragung.....	157
5.2.4	Änderungen, Ergebnisse und Beschluss	160
5.3	Einsatzplanung	161
5.3.1	Schutzverbauungen Klammstein (ÖBB).....	161
5.3.2	Gebäudeinspektion ABM Graz-Raaba (ASFINAG)	162
5.3.3	Italienschleife (ÖBB).....	163
5.3.4	Murbrücke (ASFINAG).....	165
5.4	Datenauswertung UAS	167
5.4.1	Schutzverbauungen Klammstein (ÖBB).....	167
5.4.2	Gebäudeinspektion ABM Graz-Raaba (ASFINAG)	171
5.4.3	Italienschleife (ÖBB)	174
5.4.4	Murbrücke (ASFINAG).....	178
5.5	Zustandsanalyse	181
5.6	Vergleich und SWOT-Analyse	187
5.7	Ergebnisse und Empfehlungen.....	188
6	Zustandserfassung Naturgefahren.....	191
6.1	Konzeption Zustandserfassung	191
6.2	Auswahl Einsatzgebiet	193
6.2.1	Ziel der Auswahl	193
6.2.2	Brainstorming-Workshops	193
6.2.3	Expertenbefragung.....	194
6.2.4	Ergebnis und Beschluss	195
6.2.5	Änderungen, Ergebnisse und Beschluss	195
6.3	Einsatzplanung und Sicherheitsvorkehrung.....	196
6.3.1	Steinschüttmure (ASFINAG).....	196
6.3.2	Schneemächtigkeitserfassung Hochkar (ÖBB)	198
6.3.3	Schneezustandserfassung Hochkar und Sensorausbringung (ÖBB)	199
6.3.4	Lawinensprengung (ASFINAG/ÖBB).....	199
6.4	Datenauswertung UAS	202
6.4.1	Schüttmure IMST (ASFINAG)	202
6.4.2	Schneezustandserfassung Hochkar	206
6.5	Schneefallereignisse, Simulationsmodell und LCC -Analyse	210
6.5.1	Streckensperren, Ausfälle und Kosten.....	210
6.5.2	Schneefallcharakteristik und praktische Erfassung	212
6.5.3	Lawinenschutz und Wirtschaftlichkeit	216
6.5.4	Lebenszykluskostenmodell	218

6.5.5	Ereignisauswertung und Simulationsmodell	220
6.5.6	Anwendungsbeispiele und Ergebnisse	225
6.6	Konzept Sensornetzwerk.....	228
6.7	Vergleich und SWOT-Analyse.....	230
6.8	Ergebnisse und Empfehlungen	231
7	Zustandserfassung Strecke	233
7.1	Konzeption Zustandserfassung.....	233
7.2	Auswahl Einsatzgebiet.....	235
7.2.1	Ziel der Auswahl.....	235
7.2.2	Brainstorming-Workshops.....	235
7.2.3	Expertenbefragung	236
7.2.4	Ergebnis und Beschluss.....	238
7.3	Einsatzplanung Strecke	239
7.3.1	Streckeninspektion Pöchlarn und Rastplatz (ASFINAG)	239
7.3.2	Streckeninspektion St. Pölten (ÖBB).....	241
7.4	Datenauswertung Einsatz	243
7.4.1	Streckeninspektion Pöchlarn und Rastplatz (ASFINAG)	243
7.4.2	Streckeninspektion St. Pölten (ÖBB).....	248
7.5	Vergleich und SWOT-Analyse.....	250
7.6	Ergebnisse und Empfehlungen	251
8	Zustandserfassung Ereignisse.....	253
8.1	Konzeption Zustandserfassung.....	253
8.2	Auswahl Einsatzgebiet/Fälle	255
8.2.1	Brainstorming-Workshops.....	255
8.2.2	Expertenbefragung	256
8.2.3	Ergebnis und Beschluss.....	257
8.2.4	Änderungen und Terminvorschau.....	258
8.3	Einsatzplanung.....	258
8.3.1	Einsatzübung Tunnel A9 (ASFINAG).....	258
8.4	Vergleich und SWOT-Analyse.....	262
8.5	Ergebnisse und Empfehlungen	263
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	265
10	Anhang	273
10.1	Abbildungsverzeichnis.....	273
10.2	Tabellenverzeichnis	279
10.3	Literaturverzeichnis	281
10.4	Materialien.....	284
10.5	Laborversuche - Ergebnisse und Protokolle.....	284

10.5.1	Versuchsprogramm I – Protokoll	284
10.5.2	Versuchsprogramm II – Protokoll	284
10.5.3	Georadar – Protokoll.....	284
10.5.4	Hyperspektralauswertungen – Chlorid und Karbonatisierung	284
10.5.5	Anwendung zerstörungsfreie Untersuchungen Betontragwerke.....	284
10.5.6	Übersichtstabelle Laborergebnisse	284

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Leitungs- bzw. Verkehrsinfrastruktur ermöglicht wirtschaftliche Beziehungen zwischen Standorten und erlaubt die Teilhabe an Ressourcen, Produkten und Nutzungen in einem gemeinsamen Markt. Die Bereitstellung von Verkehrsinfrastruktur erfordert hohe Anfangsinvestitionen sowie laufende Reinvestitionen mit langfristiger Mittelbindung aufgrund der hohen Lebensdauer der Anlagen im Vergleich zu anderen Wirtschaftsgütern. Die hochrangigen Verkehrsnetze von ÖBB und ASFINAG sind in Österreich bis auf einige große Bauvorhaben (ÖBB: Koralm-, Semmering-, Brennertunnel; ASFINAG: Tunnelsicherheit, Autobahnring Wien) bereits sehr gut ausgebaut. Der Schwerpunkt der künftigen Tätigkeit hat (ÖBB) bzw. wird sich (ASFINAG) daher mittel- bis langfristig noch stärker in Richtung Instandsetzung und Erneuerung am Kernnetz verschieben³. Mit Ende 2015 lagen die langfristigen Vermögenswerte der ASFINAG (2.200 km Netz) bei 15,3 Mrd. € wobei ein Überschuss von 549 Mio. € trotz der getätigten Infrastrukturinvestitionen für Erhaltung mit 496 Mio. € und dem Neubau mit 394 Mio. € erzielt werden konnte⁴. Für die ÖBB (Gleise Kernnetz 5.450 km, Ergänzungsnetz 1.298 km, Baulänge Kernnetz 3.647 km, Ergänzungsnetz 1.298 km) lag der ermittelte technische Wiederbeschaffungswert der Anlagen im Jahr 2015 bei rund 40 Mrd. € Aufgrund des Anlagenalters und Zustands wird von einem stabilen jährlichen Erneuerungsbedarf von 580 bis 600 Mio. € pro Jahr ausgegangen⁵.

Aus dem Ziel der effizienten Bereitstellung dieser hochrangigen Verkehrsinfrastrukturen und ihrer Nebenanlagen in gutem Zustand bzw. mit hoher Sicherheit und Verfügbarkeit ergibt sich das Erfordernis die Zustandsentwicklung dieser Anlagen möglichst gut zu kennen. Demgemäß sind alle Anlagen gemäß den einschlägigen Vorschriften (RVS, ÖN, EN etc.), Dienstanweisungen und Empfehlungen laufend zu kontrollieren bzw. mittels periodischer (eigener) Kontrollen und (externer) Prüfungen zu erfassen und zu bewerten. Im Gegensatz zur messtechnischen Erfassung von Straßenoberbau (RoadSTAR) bzw. Gleislage (Oberbaumessfahrzeug) erfolgen Inspektion und Zustandserfassung von Bauwerken und Strecken von ÖBB und ASFINAG weitgehend manuell anhand von Checklisten sowie (punktuellen) Einzelmessungen. Das Ergebnis ist ein Prüfbericht mit Dokumentation (Fotos, Beschreibung) allfälliger Vorkommnisse, einer Benotung von Anlagen bzw. Anlagenteilen gemäß dem Schulnotenprinzip sowie Empfehlungen hinsichtlich der weiteren Vorgehensweise. Aufbauend auf diesen Grundlagen erfolgt dann eine systematische Planung, Priorisierung und Umsetzung entsprechender Maßnahmen im Rahmen des Erhaltungsmanagements.

Im Gegensatz zu der Linienstruktur hochrangiger Verkehrsnetze betreffen die Naturgefahren (Hochwasser, Muren, Lawinen, Steinschlag etc.) Menschen, Umwelt sowie Sach- und Vermögenswerte flächig bzw. Verkehrsnetze unmittelbar punktuell bzw. abschnittsweise in ihrem Einzugsgebiet. Als natürliche Gefahrenquelle können Häufigkeit und Intensität der auslösenden (meteorologischen) Ereignisse nicht direkt beeinflusst werden. Vielmehr geht es darum, die Schwere möglicher Konsequenzen durch entsprechendes Risikomanagement zu minimieren. Dazu muss 1)

³ *HOFFMANN, M. (2018); Lebenszykluskosten der Straßeninfrastruktur; Habilitationsschrift; S17-62 (in Publikation)*

⁴ *ASFINAG – Geschäftsbericht 2015; S86-101*

⁵ *ÖBB – INFRA – Netzzustandsbericht 2015; S4-5*

Schadensprävention im Vorfeld betrieben werden; 2) während Schadensereignissen schadensminimierende Maßnahmen gesetzt und 3) Betroffenen nach Schadenseintritt rasch geholfen werden bzw. allfällige Ausfälle und Störungen der Infrastruktur beseitigt werden⁶. Die Methodik der Zustandserfassung und Bewertung orientiert sich weitgehend am System für Kunstbauwerke (Brücken) und erfolgt überwiegend manuell sowie fallweise messtechnisch (Laserscan, Radar etc.).

Die Gesetzgebung und Vollziehung betreffend Schutz vor Naturgefahren obliegen je nach Fachmaterie verschiedenen Gebietskörperschaften in Abstimmung mit den zuständigen Infrastrukturbetreibern (ÖBB, ASFINAG). In der Wildbach- und Lawinenverbauung (BMWULF) werden daher Gefahrenzonenpläne (ca. 1.450) erstellt bzw. laufend aktualisiert, Gutachten erstellt und eingeholt (13.800 p.a.) sowie etwa 120 Mio. € für Bau und Erhaltung von ca. 200.000 Bauwerken der Wildbach- und Lawinenverbauung (Anlagevermögen ca. 5.8 Mrd. €) pro Jahr ausgegeben⁷. ÖBB und ASFINAG haben eigene Anlagen zum Schutz ihrer Strecken und Bauwerke, die überwiegend auf eine präventive Wirkung und passive Gefahrenabwehr ausgerichtet sind und von diesen überprüft, instandgesetzt und erneuert werden. So betreut die ÖBB 165.000 lfm Steinschlag- und Lawinenschutzverbauung, überwacht 3.000 ha Felsflächen und 2.800 ha Schutzwälder⁸. Sowohl die Vorbeugung künftiger Katastrophenschäden, als auch die Beseitigung eingetretener Katastrophenschäden werden daher von allen Gebietskörperschaften bzw. Infrastrukturbetreibern (sowie Versicherungen) mitfinanziert⁹. Der Schwerpunkt der Präventivmaßnahmen ergibt sich insbesondere auch aus der Ausgabenstruktur des Katastrophenfonds (2012: 349 Mio. € 2013: 374 Mio. € 2014: 398 Mio. € 2015: 358 Mio. €)¹⁰.

Unabhängig davon, ob betriebliche und bauliche Erhaltungsmaßnahmen geplant oder Naturgefahren präventiv abgewehrt bzw. nachträglich minimiert oder quantifiziert werden, ist eine systematische, wiederholbare und effiziente Inspektion und Erfassung wesentliche Basis. Gerade an Bauwerken und Strecken sowie der Erfassung von Naturgefahren erfolgt der überwiegende Anteil der Inspektionen noch immer weitgehend manuell, was einen hohen Aufwand bei begrenzter Wiederholbarkeit mit sich bringt. Im letzten Jahrzehnt wurde zudem eine Vielzahl an unterschiedlichsten Forschungsprojekten zu stationären und mobilen Erfassungssystemen mit unterschiedlichem Erfolg in der Praxis getestet¹¹. Die derzeit verwendeten und fallweise entwickelten Erfassungssysteme decken jedoch in der Regel entweder Naturgefahren oder Bauwerkszustände, nicht jedoch beide Aspekte systematisch ab, zumal die Anforderungen doch recht unterschiedlich sind. Daher gibt es keinen etablierten durchgehenden Standard in der messtechnischen Erfassung. Weitere ungelöste Herausforderungen bestehen in der Speicherung und Verarbeitung der erfassten Datenmengen mit dem kompletten Workflow und Integration in die Systeme des Infrastrukturmanagements. Aus der Notwendigkeit eines flächendeckenden Einsatzes und der begrenzten Mittel ergibt sich zudem die Anforderung einer hohen sowie flexiblen Erfassungskapazität bei vergleichsweise geringen Kosten mittels stationärer und mobiler Sensorik im Infrastrukturbereich.

⁶ SINABELL, F. et. al. (2016)

⁷ MANNBERGER, G (2014)

⁸ KAPFERER, J. (2016)

⁹ RECHNUNGSHOF (2014)

¹⁰ BMF (2015; 2016)

¹¹ VIF – Projekte: riskCAST; DESME; RADAR (VIF2011); ALPINE SPACE – PARAMount (2009-2012) u.a.

1.2 Zielsetzung, Aufgaben und Abgrenzung

Im Infrastrukturbereich werden die Inspektionen manuell bzw. teilautomatisiert durchgeführt. Durch den Einsatz moderner Technologien sollen Möglichkeiten geschaffen werden, diese Abläufe noch weiter zu optimieren. Die VIF – Ausschreibung 2016 zur mobilen Sensorik im Infrastrukturbereich (Pkt. 2.3.6) zielt nunmehr darauf ab, Inspektionen des baulichen Zustands an Bauwerken, Anlagen und Strecken sowie Erfassung und Minimierung von Naturgefahren sowie besonderen Ereignissen durch moderne Technologien zu optimieren. Die vorgeschlagenen Ansätze sind dazu mit bestehenden Systemen zu vergleichen, praktisch zu testen und der gesamte Workflow bis zu den Ergebnissen darzustellen. Im Zuge des Forschungsprojektes werden für die oben genannten Teilbereiche u.a. folgende Ergebnisse erwartet¹²:

- Wissenschaftliche Gegenüberstellung unterschiedlicher Systeme zur mobilen Bestands- und Zustandserfassung mit Sensorik inkl. anschließender, zielorientierter Auswertung
- Kosten/Nutzen Betrachtungen des Einsatzes der mobilen Sensorik im Vergleich zu existierenden Systemen
- Praxistests in allen angeführten Bereichen als proof-of-concept
- Automatisiertes Gesamtsystem zur gezielten Nutzung der erhobenen Daten mit folgenden integralen Bestandteilen, sowie Testsysteme mit nachstehenden Funktionalitäten:
 - Systematik für Datenmanagement und Dokumentation des Anlagenzustandes bzw. der Änderungen im Anlagenzustand (Change Detektion)
 - Benutzerfreundliche Darstellung der Daten und der relevanten Änderungen für die Auswertung (z.B. 3D Modell)
 - Automatisierte Analyse der aufgenommenen Daten, für die angeführten Anwendungsgebiete in Relevanz für die angeführten Problemstellungen

Ziele und Aufgaben a) Bauwerke:

- Zustandserfassung und Brücke und Stützmauer mit Drohnen und entsprechenden Sensoren
- Erfassen Betonzustand und Schäden anhand von Orthofotos nach Ausmaß und Schwere
- Ermitteln Feuchtstellen und Gefügeschäden (Foto, Infrarot, Multispektralanalyse)
- Datenverarbeitung mit Viewer für die Beurteilung von Veränderungen
- Abläufe, Anforderungen und Einbindung in bestehende Systeme (ASFINAG, ÖBB)
- Vergleich erfasster Schäden und Aufwand konventionelle Brücken/Stützmauerprüfung
- Einsatzempfehlungen mit Analyse Kosten und Nutzen sowie Folgen Ausrollung

Ziele und Aufgaben b) Naturgefahren:

- Zustandserfassung, Maßnahmenvorbereitung und Einsatz von UAS in Gefahrenbereichen bzw. vor/während/nach Naturgefahren
- Erfassen Rutschhang bzw. Vermurung (davor/danach mit Mengenermittlung)
- Vorbereitung und Umsetzung Lawinensprengungen mit Drohneneinsatz
- Datenverarbeitung mit Beurteilung der Ergebnisse zusammen mit Aufwandsermittlung
- Konzeption der Abläufe, Anforderungen und Einbindung in bestehende Systeme (ASFINAG, ÖBB)
- Ausarbeiten Einsatzempfehlungen mit Szenario-Analyse sowie Folgen Ausrollung

¹² vgl. FFG (2016): Ausschreibungsleitfaden Mobilität der Zukunft: Verkehrsinfrastrukturforschung VIF2016; Wien

Ziele und Aufgaben c) Streckeninspektion:

- Zustandserfassung mit UAS von Strecken der ÖBB und ASFINAG (je ca. 3 km)
- Visuelle Analyse und Detektion streckenfremder Objekte/Änderung durch Operator/Analyst (LIVE, OFFLINE)
- Umsetzung Detektion von Veränderungen (künstl. Objekte, mit Differenzmapping TIN)
- Erfassen von Handlungsbedarf (Bewuchs, Rutschungen, bauliche Änderungen, Schäden)
- Bestandserfassung mit GIS – Einbindung (Orthofotos, Geländemodelle etc.)
- Ermittlung der Wiederholgenauigkeit Befliegungen und Vergleich Standardinspektion
- Einsatzempfehlungen mit Analyse Kosten und Nutzen sowie Folgen Ausrollung

Ziele und Aufgaben d) Aufklärung und Abwehr:

- Einsatz von UAS in der Streckenaufklärung und Gefahrenabwehr von ÖBB und ASFINAG
- Schnelle Streckenaufklärung bei Zutritt unbefugter mittels UAV (z.B. Thermografie, Kamera)
- Aufklärung bei Störmeldungen an Anlagen (z.B. Steinschlag, beschl. Sensor)
- Aufklärung andere Störungen (z.B. Kupferdiebstahl)
- Fotogrammetrische Erfassung von Unfällen oder Ereignissen (stationär)
- Gefahrenabwehr / Jammern / Identifikation bei Zutritt Unbefugter (stationär)

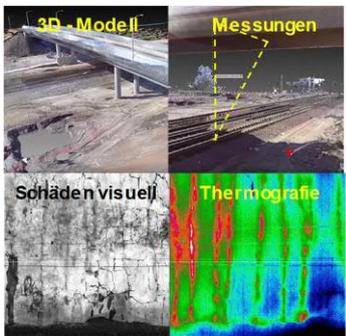
Zusammenfassend besteht das Ziel des Forschungsprojektes RISKMON in der Konzeption und Umsetzung teilautomatisierter Inspektionen von Bauwerken, Naturgefahren, Bestandsstrecken und außergewöhnlicher Ereignisse mittels industrieller Hochleistungsdrohnen und entsprechender Sensorik (UAS/UAV). Im Forschungsvorhaben ist der gesamte Weg von der Konzeption spezifischer Lösungen für jeden Anwendungsfall der Punkte A) bis D) von der Datenerfassung und Auswertung bis zur konzeptionellen Integration in die Bestandssysteme des Infrastrukturmanagements auf Basis eines ganzheitlichen Ansatzes im Vergleich zu bisherigen Methoden zu zeigen. Aufbauend auf die Erfahrungen und Referenzen der Projektpartner ist in RISKMON der Proof of Concept, Application, Efficiency and Integration für die Anwendungsfälle zu erbringen. Mit den Ergebnissen soll den Auftraggebern zudem Entscheidungsgrundlagen, Instrumente und eine Plattform für einen sinnvollen und effizienten Einsatz dieser Technologien in die Hand gegeben werden¹³.

¹³ HOFFMANN, M. et.al. (2017)

1.3 Vorgehen und Methodik

Die Gewährleistung von Sicherheit und Funktionsfähigkeit sowie Erhaltung des Anlagenbestandes ist eine der vordringlichsten Aufgaben von Betreibern hochrangiger Verkehrsinfrastrukturen (ÖBB, ASFINAG). Dementsprechend kommt einer effizienten, wiederholbaren messtechnischen a) Inspektion und Zustandserfassung als Basis optimaler Investitionsentscheidungen eine hohe Bedeutung zu. Die Arbeitspakete des Forschungsprojektes RISKMON beinhalten alle Schritte von der systematischen Analyse der konventionellen Erfassungsmethoden bis zur Konzeption, Anwendung und Vergleich teilautomatisierter Erfassungsmethoden mittels industrieller Hochleistungsdrohnen. Der Mehrwert liegt einerseits in den hochpräzisen Erfassungsmethoden und andererseits in der ganzheitlichen Konzeption und Umsetzung von der Datenerfassung über die Auswertung und Analyse bis zur Integration in das Infrastrukturmanagement. Aufgrund der großen Datenmengen ist es für Betreiber weiters entscheidend, dass der gesamte Prozess von der Datenakquisition und Verarbeitung bis hin zur Datenhaltung in RISKMON möglichst vollständig untersucht und beschrieben wird.

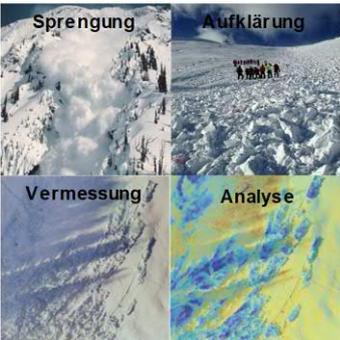
Tabelle 1: Kurzbeschreibung Lösungsansätze a) Inspektion ausgewählter Bauwerke

Symbol & Beispiele	Allgemeine Beschreibung
<p>Inspektion & Vermessung:</p> 	<p>Allgemeines: Die Terrain- und Bauwerkserfassung mittels Laserscan (Boden/Flugzeug) und fotogrammetrische Auswertung, 3D – Modellen und Plänen ist mittlerweile technischer Standard. Die Vorteile des Einsatzes industrieller Hochleistungsdrohnen (mit Kameras, Laserscan, Thermografie etc.) liegen in der hohen Erfassungskapazität und spezifisch anpassbarem Equipment mit geringen Kosten sowie der flexiblen Erfassung schwer zugänglicher Bereiche. Die Aufnahmen und erstellten 3D – Modelle ermöglichen eine messtechnische Auswertung des Bauwerkszustands, wodurch ein möglicher Schadensfortschritt bis hin zu Bewegungen des Bauwerkes (Biegung, Kippen) zwischen Erfassungen exakt quantifizierbar werden. Die Erfassungsmethoden sind erprobt¹⁴ und werden in RISKMON sinnvoll kombiniert.</p>
<p>Erfassung & Auswertung:</p> 	<p>RISKMON: Die Analyse der konventionellen Ansätze in der Inspektion aller in der Ausschreibung genannten Bauwerke bildet die Basis der Erfassung und Zustandsbewertung von 2x Bauwerken sowie 2x Schutzbauten in Abstimmung mit den AG. Gemäß den Anforderungen wird der gesamte Workflow von der Aufnahme (mit Kameras, Laserscan, Thermografie etc.) bis zur Bewertung und Vergleich für diese 2x2 Beispiele vollständig abgedeckt (AP1-AP3). Die Skalierbarkeit der verwendeten Methoden auf die übrigen Bauwerke wird über die Ergebnisevaluierung und Optimierung des Konzeptes für die teilautomatisierte Inspektion sichergestellt (AP4). Zusammen mit der Ergebnisaufbereitung (AP5) wird für Punkt a) Inspektion der Ausschreibung ein Proof of Concept, Application, Efficiency and Integration erbracht.</p>

¹⁴ vgl. PARK, H. S. et. al (2007); MONSERRAT, O. et. al. (2008); LUBOWIECKA, I. et. al. (2009)

Schutzmaßnahmen gegen b) Naturgefahren generell bzw. bei Lawinengefahr können in permanente aktive (z.B. Verbau, Schutzwald, Galerien, Tunnel) und temporäre aktive (z.B. Lawinenauslösung, Sperre, Evakuierung) bzw. permanente passive (z.B. Gefahrenzonen, Raumplanung, Objektschutz) sowie temporäre passive (Prognose, Warnung, Vorsorge, Ausrüstung) Maßnahmen unterschieden werden. Die im Forschungsprojekt RISKMON in Bezug auf B) Naturgefahren verfolgten Ansätze konzentrieren sich auf die Datenerfassung vor Ereignissen als Grundlage für temporäre und permanente passive Maßnahmen. Weiters beinhalten sie die Aufklärung und Analyse während und nach Ereignissen für schnelle Ergebnisse bei fast jeder Witterung ohne Gefährdung des Einsatzpersonals sowie konkrete Action durch die Ausbringung von stationären Sensoren sowie Sprengung von Lawinen mit Drohneneinsatz zur Minimierung von Naturgefahren (temporär aktiv). Die Aufklärung und Suche nach Verschütteten sind prinzipiell ebenfalls möglich, waren aber nicht Teil des Projektes.

Tabelle 2: Kurzbeschreibung Lösungsansätze b) Naturgefahren

Symbol & Beispiele	Allgemeine Beschreibung
<p>Analyse Rutschhänge:</p> 	<p>Allgemeines: Der Einsatz von UAS in der Datenerfassung von Naturgefahren bzw. vor, während und nach Ereignissen hat sich in der Praxis bewährt und ist in der Literatur gut dokumentiert¹⁵. Die Vorteile des Einsatzes industrieller Hochleistungsdrohnen (mit Kameras, Laserscan, Thermografie etc.) liegen vor allem in den geringen Kosten und dem flexiblen, schnellen Einsatz bei hoher Erfassungskapazität. Die Besonderheit im Forschungsvorhaben liegt darin, dass alle wesentlichen Einsatzmöglichkeiten bei Naturgefahren aus Sicht von Infrastrukturbetreibern abgedeckt werden können. Dies beinhaltet neben der üblichen Datenerfassung vor allem die Aufklärung während und nach Ereignissen sowie Einsätze zur Verbesserung der Überwachung (Sensoren) und präventiven Schadensminimierung (Sprengung).</p>
<p>Sprengung/Aufklärung:¹⁶</p> 	<p>RISKMON: Die Analyse der konventionellen Ansätze in der Erfassung und Minimierung von b) Naturgefahren gemäß Ausschreibung bildet die Basis der Erfassung von Naturgefahren (z.B. Lawine, Rutschung) mittels industrieller Hochleistungsdrohnen. Weiters beinhaltet dies die Ausbringung von Sensoren an schwer zugängliche Stellen* sowie Lawinensprengung (AP1-AP3). Die Skalierbarkeit der verwendeten Methoden auf weitere Anwendungsfelder in b) Naturgefahren wird über die Ergebnisevaluierung und Optimierung des Konzeptes für Aufklärung und Action sichergestellt (AP4). Zusammen mit der Ergebnisaufbereitung (AP5) wird somit für Punkt b) der Ausschreibung im Forschungsprojekt ein Proof of Concept, Application, Efficiency and Integration erbracht.</p>

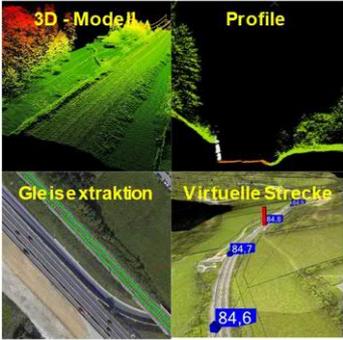
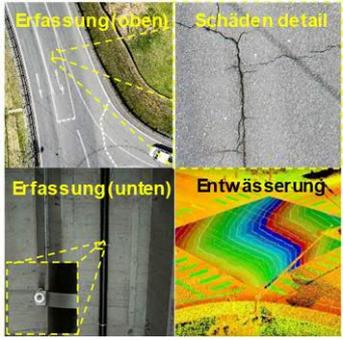
*Die ursprünglich für die Ausbringung vorgesehenen Sensoren haben sich als nicht geeignet erwiesen, weshalb ein neuer Sensortyp aufbauend auf die Erkenntnisse in RISKMON konzipiert und beschrieben wurde (vgl. Kap. 6.6)

¹⁵ vgl. JIA-CHONG, D. et. al. (2007)

¹⁶ vgl. PROKOP, A. et. al. (2013); SKOLAUT, C. et. al. (2014); ALBRIGTSEN, A. (2016)

Unter c) Streckeninspektion in der Ausschreibung geht es in erster Linie um eine leistungsfähige Sensorik zur (teil-)automatisierten Detektion von Abweichungen gegenüber einem definierten „Null“-Zustand Abweichungen/Störungen mit Datenverarbeitung und Meldung wesentlicher Abweichungen in Echtzeit. Obwohl linienhafte Verkehrsinfrastrukturen prinzipiell eine gute Eignung für standardisierte automatisierte Erfassungen aufweisen, liegt die Herausforderung in der Verarbeitung großen Datenmengen, der Erkennung wesentlicher Streckenelemente sowie der Klassifizierung von Abweichungen. Während die Erfassung mittels Laserfilmmessungen oder Laserscans von Fahrzeugen aus weitgehend standardisiert ist, stehen die umgesetzten Algorithmen zur automatisierten Klassifikation von Kontext und Abweichungen erst am Beginn. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erfolgt die Klassifikation entweder über manuelle Auswertungen durch Experten oder simple Abweichungsanalysen und nur in Ausnahmefällen über Kontextanalyse. Im Forschungsprojekt RISKMON geht es in erster Linie um die Inspektion mit industriellen Hochleistungsdrohnen und Analyse von je 1x Streckenabschnitt von ÖBB und ASFINAG (ca. 3 km) in Bezug auf Wiederholgenauigkeit, Abweichungen etc.

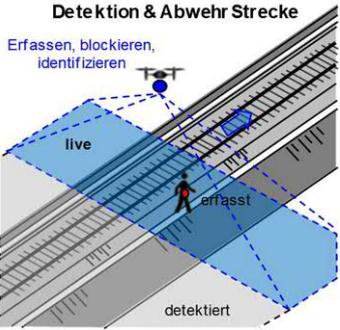
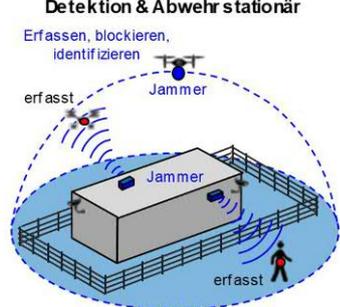
Tabelle 3: Kurzbeschreibung Lösungsansätze c) Streckeninspektion

Symbol & Beispiele	Allgemeine Beschreibung
<p>Streckenabschnitt Bahn:</p> 	<p>Allgemeines: Der Einsatz automatisierter an Fahrzeugen fix verbauter Erfassungssysteme für Gleislage und Zustand des Straßenoberbaus bis hin zum Laserscan der angrenzenden Flächen ist mittlerweile gut etabliert. Die Erfassung z.B. von Leitungstrassen (Hochspannung) mittels UAS steht dagegen erst am Anfang¹⁷. Die Vorteile des Einsatzes industrieller Hochleistungsdrohnen (mit Kameras, Laserscan, Thermografie etc.) liegen in der hohen, flexiblen Erfassungskapazität bei vergleichsweise geringen Kosten sowie freien Wahl der Aufnahmeperspektive. Die Projektpartner verfügen zudem über die notwendige Expertise in der Extraktion von Referenzprofilen, Kontextinformation, Abweichungsanalyse und Schadensdetektion. Dies ermöglicht in weiterer Folge sowohl Expertenanalysen und automatisierte Workflows.</p>
<p>Streckenabschnitt Straße:</p> 	<p>RISKMON: Die Analyse der konventionellen Ansätze in routinemäßigen b) Streckeninspektionen bis hin zu Messkampagnen bilden die Basis von je 1x Streckenabschnitten (3 km) von ÖBB und ASFINAG. Die Aspekte des unautorisierten Betretens werden dagegen unter d) behandelt. Die Auswertung und Abweichungsanalyse erfolgt durch mindestens 2x Befliegung der Strecke mit digitaler Abweichungsauswertung sowie Expertenanalyse (Zustand, Inventar etc.) gemäß Ausschreibung (AP1-AP3). Die Skalierbarkeit und Einsatzmöglichkeit der Inspektion und möglicher Messergebnisse werden über die Ergebnisevaluierung und Optimierung des Konzeptes für die teilautomatisierte Inspektion sichergestellt (AP4). Zusammen mit der Ergebnisaufbereitung (AP5) wird für c) Streckeninspektion ein Proof of Concept, Application, Efficiency and Integration erbracht.</p>

¹⁷ vgl. ELBERINK, E.O. (2013); ARASTOUNIA, M. (2015); GONG, J. et. al. (2012);

Die Aufklärung d) außergewöhnlicher Ereignisse ist die Basis zur umfassenden Erkennung von Gefahrenpotenzial und Einsatzerfordernissen sowie der zeitnahen Entscheidung in Bezug auf geeignete Maßnahmen zur Gefahrenabwehr und Herstellung eines sicheren Regelzustandes. Sowohl im Normalbetrieb, als auch bei außergewöhnlichen Ereignissen gewinnt der Schutz kritischer Systeme sowie vertraulichen Informationen zunehmend an Bedeutung. Die Herausforderung für mobile Systeme liegt in der raschen Verfügbarkeit und der flexiblen Anpassung der Reaktionsmöglichkeiten je nach Ereignisklasse. Das Anwendungsspektrum reicht von der flexiblen Aufklärung z.B. bei Unfallereignissen, Rekonstruktion von Unfallhergängen, Erfassen und Identifikation Unbefugter die sich im Streckenkorridor oder stationären Einsatzorten sowie Schutz von Anlagen mit Zugangsbeschränkung. Darüber hinaus können das unbefugte Eindringen und Erstellung von Aufnahmen kritischer Anlagen der (Verkehrs-)Infrastruktur mittels entsprechender Techniken verhindert werden. Im Forschungsprojekt RISKMON liegt der Fokus auf dem Einsatz zur Aufklärung (z.B. 1x Verkehrsunfalls) sowie der Abwehr und Identifikation Unbefugter auf der Strecke sowie stationärer Einsatzorte.

Tabelle 4: Kurzbeschreibung Lösungsansätze d) Außergewöhnliche Ereignisse

Symbol & Beispiele	Allgemeine Beschreibung
<p>Strecke & Korridor:</p> <p>Detektion & Abwehr Strecke</p> <p>Erfassen, blockieren, identifizieren</p> 	<p>Allgemeines: Aufgrund der Sicherheitslage sowie dem Wunsch nach Kontrolle hat die Anzahl stationärer und mobiler Überwachungseinheiten stark zugenommen, was Fragen nach den technischen und rechtlichen Konsequenzen aufwirft¹⁸. Während der unbefugte Zutritt zu Einzelanlagen (Absperrung, Kameras, Bewegungsmelder etc.) vergleichsweise gut geschützt werden kann, ist dies für linienhafte Verkehrsinfrastrukturen sowie Aufklärung und Schutz von Einsatzorten ohne mobile Erfassungseinheiten nicht möglich. Der Vorteil industrieller Hochleistungsdrohnen (Thermokameras, Jammern, autonomer Echtzeiteinsatz) liegt in der Möglichkeit des schnellen Einsatzes und Abwehr, Verfolgung sowie Identifikation Unbefugter. Sofern die Aufklärung auf betriebseigenem Gelände bzw. mit Genehmigung bei Ereignissen erfolgt, sollte der Einsatz rechtlich in Ordnung sein.</p>
<p>Stationär & Einsatzort:</p> <p>Detektion & Abwehr stationär</p> <p>Erfassen, blockieren, identifizieren</p> 	<p>RISKMON: Die Analyse der Einsatzpläne für die unterschiedlichen Klassen von d) außergewöhnlichen Ereignissen erfolgt zusammen mit den Auftraggebern. Auf dieser Basis erfolgt die Planung und Umsetzung von Einsätzen für 1x Aufklärung (z.B. Unfall); 1x Detektion und Abwehr Unbefugter auf der Strecke (z.B. Bahn) sowie 1x Abwehr und Identifikation Unbefugter, die in eine gesicherte stationäre Anlage oder Einsatzort mittels UAV eindringen (Jammer, Thermokamera) wollen (AP1-AP3). Die Skalierbarkeit für alle wesentlichen Einsatzfälle wird über Evaluierung und Optimierung des Konzeptes sichergestellt (AP4). Zusammen mit der Ergebnisaufbereitung (AP5) wird so für d) außergewöhnliche Ereignisse ein Proof of Concept, Application, Efficiency and Integration erbracht.</p>

¹⁸ vgl. GRAVESEN, G. (2015); JISRAWI, A. (2014);

Das wesentliche Element von RISKMON geht über die Auswahl der Sensoren oder das Fliegen der UAV bzw. einzelne technische Aspekte in der Datenauswertung, die Einbindung in vorhandene Systeme oder rechtliche Erfordernisse hinaus. Aufgrund der Komplexität und breit gefächerten Aufgabenstellung sowie der Anforderung an praxisrelevante Ergebnisse kommt es vielmehr auf das Zusammenwirken der einzelnen Prozessschritte in einem ganzheitlichen Ansatz an, der im Projekt bedarfs- und praxisorientiert angepasst wird. Dazu sind u.a. folgende Aspekte im Forschungsprojekt RISKMON wesentlich:

- **Drohnenauswahl:** Hochleistungs – Multicopter/Flächendrohnen/Hybrid-versionen
- **Sensorwahl:** Laserscanner, Wärmebildkamera, NIR (Nahes Infrarot), Multispektralkamera, Foto,- und Videokamera (RGB), TemperaturGas- und Strahlungssensoren, Radar (SAR, Bodenradar), Abstandssensoren, GPS – Sensoren für Abwurf, Jammer
- **Nutzlasten:** Transportvorrichtung, Abwurfvorrichtung, Lautsprecher, Sensorboxen (gleichzeitiger Einsatz mehrerer untereinander vernetzter Sensoren), Abschirmung gegen Jammer
- **Genehmigungen:** Einholung aller notwendigen Genehmigungen für den Einsatz von den zuständigen Behörden und Grundeigentümern in Abstimmung mit den Auftraggebern
- **Flugleistung:** Pilotenauswahl, Flugplan, Datenerhebung mit Hochleistungssensoren oder Unterstützung durch Spezialentwicklungen
- **Datenverarbeitung:** Datentransfer, Datenanalyse, ergebnisorientierte Visualisierung bzw. Implementierung in die Bestandssysteme

Tabelle 5: Kurzbeschreibung Lösungsansätze d) Außergewöhnliche Ereignisse

Darstellung	Allgemeine Beschreibung
<p>Das Diagramm zeigt den IQSOFT-Prozess für 'large LiDAR datasets'. Es besteht aus drei Hauptphasen: 'data acquisition', 'IQGDS geostore' und 'results'. 'data acquisition' umfasst Pointclouds, Digital Aerial Images, Digital Orthophotos, Trajectories, Digital Terrain Models, Mission Report, ... und CAD. 'IQGDS geostore' beinhaltet 'Automatic Processing' (Pointcloud Extraction, CSW catalog, ...) und eine zentrale LiDAR-Datenbank. 'results' liefern '3D visualization', 'GIS objects' und 'mission data'. Ein zweites Diagramm zeigt den 'Geodaten Prozessierung' Workflow: Anforderungsdefinition, Datenerhebung, Anlieferung, Speicherung, Prozessierung, Datenabgabe & Visualisierung, unterteilt in 'Quality Management metadata'.</p>	<p>Infrastrukturbetreiber von Bahn und Straße sind unter anderem mit linearen Anlagen (linear assets) befasst, welche im Umgang mit den gewonnenen LiDAR Daten eine spezielle Berücksichtigung dieses linearen Aspekts erfordern. Die bei IQSOFT vorhandene Software sowie entwickelten Tools sind in der Lage diese Aufgaben weitgehend automatisiert zu übernehmen und schaffen damit die Grundlagen für weitergehende Analyse & Auswertungen.</p> <p>Die Herausforderung im Forschungsprojekt RISKMON besteht darin, die Daten aus der Erfassung gemäß den entwickelten Erfassungskonzepten auszuwerten und in die Bestandssysteme der Betreiber (ÖBB, ASFINAG) zu integrieren. Die nebenstehende Darstellung zeigt exemplarisch diesen Workflow auf und wird für die ausgewählten Anwendungsbeispiele gemäß dem entwickelten Konzept exemplarisch implementiert.</p>

1.4 Workpackages und Zeitplan

Das Forschungsprojekt RISKMON beinhaltet eine Reihe von Arbeitspaketen, Meilensteinen und Ergebnissen zu den Aufgabenbereichen, die in den folgenden Tabellen beschrieben sind. Ausgehend von einem Überblick zum Stand von Technik und Wissenschaft und Laborversuchen zur Kalibration der Messverfahren, sowie ausgewählten Praxisanwendungen, werden die Ergebnisse jeweils nach Aufgabenbereichen zusammengefasst. Die Datenverarbeitung und mögliche Integration in Bestandssysteme gelten für alle Aufgabenbereiche, ebenso wie die Schlussfolgerungen und Empfehlungen.

Tabelle 6: Übersicht Arbeitspakete in den Aufgabenbereichen a) bis d) in RISKMON

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Dauer MM	Start MM/JJ	Ende MM/JJ	Geplantes Ergebnis
1	Analyse Erfassungsmethoden*	5	09/17	02/18	M1 - Übersicht, Datensheet, Parameter konv. Erfassung
2	Konzeption Einsatz UAV, Datenanalyse*	6	01/18	06/18	M2 – Einsatzplanung für Beispiele a) bis d)
3	Umsetzung der Anwendungsfälle	9	07/18	03/19	M3 – Inspektion; M4 – Aufklärung; M5 - Action
4	Evaluierung Ergebnisse und Konzeptoptimierung*	6	01/18	06/19	M6 – Anwendungskonzept und Einsatzempfehlungen
5	Ergebnisaufbereitung, Vergleich und Berichterlegung*	5	04/18	08/19	M7 - Proof of Concept, Application, Economic Efficiency and Integration mit Bericht und Datenbank
6	Projektmanagement und Administration	24	09/17	08/19	M8 – Fortschrittsberichte, Leistungsnachweise etc.

* Falls nicht anders spezifiziert für alle Punkte der Ausschreibung 2.3.6 A) bis D)

Tabelle 7: Übersicht Meilensteine nach Aufgabenbereichen a) bis d) in RISKMON

MS Nr.	Meilenstein Bezeichnung	Beteiligte AP	Ende Datum	Meilenstein erreicht, wenn
1	Übersicht konvent. Methoden der Erfassung	AP1	Ende 02/2018	AP1 abgeschlossen ist
2	Einsatzplanung A) bis D)	AP1-AP2	Ende 06/18	AP1-AP2 abgeschlossen ist
3	Inspektion Bauwerke und Strecke A), C)	AP3	Ende 03/19	AP1-AP3 abgeschlossen ist
4	Aufklärung Naturgefahren B) und Unbefugte D)	AP3	Ende 03/19	AP1-AP3 abgeschlossen ist
5	Action mit Sensoren, Sprengung, Jamming B), D)	AP3	Ende 03/19	AP1-AP3 abgeschlossen ist
6	Anwendungskonzept und Einsatzempfehlungen	AP1-AP4	Ende 06/19	AP1-AP4 abgeschlossen ist
7	Proof of Concept, Application, Efficiency & Integration	AP4-AP5	Ende 08/19	AP1-AP5 abgeschlossen ist
8	Fortschrittsberichte, Leistungsnachweise etc.	AP1-AP5	Ende 08/19	Nach Erfordernis bzw. Projektfortschritt

Tabelle 8: Arbeitspaketbeschreibung AP1 – Analyse Erfassungsmethoden

AP Nr.	01	Titel des AP:	Analyse Erfassungsmethoden*
Beteiligte Organisation/en (Einzelbieter oder (im Falle einer ARGE) die betreffenden ARGE- und Anzahl der Personenmonate/Organisation.			
ARGE Organisation		AP Rolle	Personenmonate
BLADESCAPE		Mitarbeit	1,6
BOKU IKI		Leitung	1,9
IQSOFT		Mitarbeit	1,0

Ziele:

Systematische Analyse konventioneller Methoden und Parameter in der teilautomatisierten Inspektion von Bauwerken und Strecken sowie der Erfassung und Minimierung von Naturgefahren sowie außergewöhnlichen Ereignissen als Basis für Konzepterstellung (AP2) und Vergleich.

Beschreibung der Inhalte:

- Systematische Analyse der verwendeten Methoden, Geräte und Sensoren sowie Parameter in Monitoring und periodischer Zustandserfassung von Bauwerken und Strecken
- Systematische Analyse der Erfassung potentieller Naturgefahren sowie den Einsatzerfordernissen und Prozessen im Fall außergewöhnlicher Ereignisse
- Detailanalyse (SWOT) der Erhebungen, Aufwendungen und Ergebnisse in den Anwendungsfällen A) Bauwerksinspektion, B) Naturgefahren, C) Streckeninspektion; D) Außergewöhnliche Ereignisse
- Einheitliche Darstellung der Ergebnisse als Basis für die Konzeption der Vorgehensweisen in Inspektion und Erfassung sowie der Gegenüberstellung in einer Nutzen-/Kosten Analyse
- Analyse der führenden Bestandssysteme der AG

Methode:

- Recherche bei und mit den Auftraggebern ÖBB und ASFINAG
- Literaturrecherche und Cross-Check Normen und Vorschriften national/international
- Analyse SWOT sowie Datenerhebung/-aufbereitung für Nutzen-/Kosten Analyse und Vergleich
- Abstimmung mit ÖBB und ASFINAG bezüglich der führenden Bestandssysteme

Meilensteine, Ergebnisse und Deliverables:

M1 Übersicht konventionelle Methoden, Parameter und Resultate Inspektion & Erfassung sowie
 der Datensheets & Bewertungstabellen als Basis für die NKU für Pkt. 2.3.6 a) bis d) gemäß
 der Ausschreibung

* Falls nicht anders spezifiziert für alle Punkte der Ausschreibung 2.3.6 a) bis d)

Tabelle 9: Arbeitspaketbeschreibung AP2 – Einsatz Hochleistungsdrohnen & Datenanalyse

AP Nr.	02	Titel des AP:	Konzeption Einsatz Hochleistungsdrohnen & Datenanalyse*
Beteiligte Organisation/en (Einzelbieter oder (im Falle einer ARGE) die betreffenden ARGE- und Anzahl der Personenmonate/Organisation.			
ARGE Organisation		AP Rolle	Personenmonate
BLADESCAPE		Leitung	1,4
BOKU IKI		Mitarbeit	1,0
IQSOFT		Mitarbeit	1,0

Ziele:
 Auswahl geeigneter Hochleistungsdrohnen, Bestückung mit Sensoren (Kameras, Laserscan, Thermografie) sowie ferngesteuerter Transportvorrichtungen (Sensoren, Sprengmittel) zusammen mit geeigneter Software, Darstellungsformate und Schnittstellen bis hin zu den Anforderungen der Drohnenpiloten. Konzeption, Installation und Anpassung der notwendigen IT Systeme

Beschreibung der Inhalte:

- Auswahl des geeigneten Fluggerätes bzw. mobile Einheiten inkl. Prüfung auf Sonderanfertigungen
- Auswahl der geeigneten Sensoren
- Auswahl der geeigneten Softwaretools zur Datenaufbereitung und -analyse Konzeption
- Installation und Anpassung der notwendigen IT Systeme
- Auswahl der geeigneten Darstellungsform der Ergebnisse
- Definition des Datenformates und Form der Ergebnisübergabe an ASFINAG bzw. ÖBB
- Erarbeitung der Anforderungen an die Piloten
- Ausarbeitung der Ansuchen für die benötigten Bewilligungen und Auswahl der Versicherungen
- Erarbeitung der Prozesse und Verantwortlichkeiten inkl. Schnittstellendefinition (Standardisierung) Bauwerke & Anlagen Management und FE-Programme
- Ausarbeitung des erwarteten Effizienzpotenzials je Anwendungsfall zum Status Quo hinsichtlich Kosten, Zeitaufwand, Qualität und Dokumentation, sowie Ausblick weiterer Anwendungsfelder

Methode:

- Abstimmung Anwendungsfälle & Einsatz Behörden sowie Auftraggebern ÖBB und ASFINAG
- Konkrete Einsatzplanung für Anwendungsbeispiele und Konzept übrige Fälle
- Vorbereitung Drohnenausstattung (Thermografie, Kameras, Laserscan, Jammer etc.)
- Darstellung und Systematik Workflow & Schnittstellen von Erfassung bis Integration

Meilensteine, Ergebnisse und Deliverables:

M2 Daten-lyse	Ausgearbeitete Einsatzplanung vom Einsatz der mobilen Hochleistungsdrohnen bis zur verarbeitung und Einbindung in die Systeme der Infrastrukturerhaltung und Ergebnisana-
---------------	---

* Falls nicht anders spezifiziert für alle Punkte der Ausschreibung 2.3.6 A) bis D)

Tabelle 10: Arbeitspaketbeschreibung AP3 – Umsetzung Anwendungsfälle

AP Nr.	03	Titel des AP:	Umsetzung der Anwendungsfälle
Beteiligte Organisation/en (Einzelbieter oder (im Falle einer ARGE) die betreffenden ARGE- und Anzahl der Personenmonate/Organisation.			
ARGE Organisation		AP Rolle	Personenmonate
BLADESCAPE		Leitung	3,6
BOKU IKI		Mitarbeit	1,9
IQSOFT		Mitarbeit	3,5

Ziele:

Umsetzung Anwendungsfälle von Inspektion und Erfassung für A) bis D) mit den Schwerpunkten:
 Inspektion: 2x Bauwerke, 2x Schutzbauten, 2 Streckenabschnitten (3 km) (Scan, 3D Modelle etc.)
 Aufklärung: Live & Aufklärung 2x Naturgefahren, 2x Ereignis (Unfallort, Betreten Strecke)
 Action: 1x Ausbringung Sensoren (Lawine/Rutschhang), 1x Sprengmittel (Lawine), 1x Abwehr
 Datenmanagement: Speicherung und Aufbereiten der Datenlieferungen

Beschreibung der Inhalte:

- Auswahl der konkreten Testobjekte mit Ausarbeitung Gesamtablauf inkl. Zeitplan je Anwendungsfall, Durchführungsvorbereitung, Beantragung der Genehmigungen, Information der Grundeigentümer bzw. Anrainer und ggf. Behörden (in Abstimmung mit Kunden), Vorbereitung der Flugplanung, Unterweisung der Piloten
- Durchführung Befliegung und Datenerfassung mit Fluggerät und Sensorik, Anfertigung Sonderlösungen und außerordentlicher Komponenten bzw. Sensoren werden bis zu einem vertretbaren Rahmen konstruiert und sonst konzipiert
- Auswertung und Datenanalyse: Softwareunterstützte Speicherung, Aufbereitung und Analyse der Daten, Sonderlösungen bzw. außerordentliche Anpassungen bestehender Standardprodukte werden bis zu einem vertretbaren Rahmen konstruiert, darüber hinaus konzeptiv aufbereitet
- Ausfertigung der Einsatzberichte und Ergebnisanalysen mit Darstellung der zusammengefassten Ergebnisse, Ausarbeiten von Handlungsempfehlungen, nach rechtlichen bzw. kundenspezifischen Anforderungen, gemeinsam mit den Kunden, Übertragung der Ergebnisse in digitaler Form gemäß vereinbartem Datenformat, 3D – Modelle und Karten für die Analysen, Ergebnisberichte und Integration in die Bestandssysteme der Kunden sowie
- Abschluss der einzelnen Anwendungsfälle

Methode:

- Umsetzung Anwendungsfälle Inspektion, Aufklärung, Action

Meilensteine, Ergebnisse und Deliverables:

- M3 Inspektion: Guide, Einsatzbericht & Ergebnisse Inspektion 2x Bauwerke, 2x Schutzverbauung, je 1x Bestandsstrecke ÖBB/ASFINAG mit 3D – Modell, Karten, Analysebericht, Datenintegration
- M4 Aufklärung: Guide & Einsatzbericht, Video, Analyse & Dokumentation 2x Ereignissen und Naturgefahren (Lawinen, Rutschhang, Steinschlagsicherung) mit Daten, Karten Analysen und Bericht sowie Datenintegration 1xAufklärung unbefugtes Betreten Strecke mit Identifikation (Kamera)
- M5 Action: Guide und konkreter Einsatz zur Minimierung von Naturgefahren mit 1x Ausbringung von Sensoren an schwer zugängliche Stellen sowie 1x Sprengmittel (LAWINEN) sowie Abwehr unbefugter Aufnahmen (Signal-Jammer Standort/Ereignisort)

* Falls nicht anders spezifiziert für alle Punkte der Ausschreibung 2.3.6 A) bis D)

Tabelle 11: Arbeitspaketbeschreibung AP4 – Evaluierung Ergebnisse und Konzeptoptimierung

AP Nr.	04	Titel des AP:	Evaluierung Ergebnisse und Konzeptoptimierung*
Beteiligte Organisation/en (Einzelbieter oder (im Falle einer ARGE) die betreffenden ARGE- und Anzahl der Personenmonate/Organisation.			
ARGE Organisation		AP Rolle	Personenmonate
BLADESCAPE		Leitung	1,1
BOKU IKI		Mitarbeit	1,0
IQSOFT		Mitarbeit	1,5

Ziele:

Entwicklung eines anwendbaren optimierten Konzeptes für den Einsatz von Hochleistungsdrohnen für alle Anwendungsfälle von Inspektion und Erfassung für A) bis D) sowie den Anwendungsbeispielen aus Inspektion, Aufklärung und Action Anwendungsfälle

Beschreibung der Inhalte:

- Evaluierung der Ergebnisse und des Gesamtablaufes
- Ausarbeitung des Effizienzsteigerungspotenzials je Anwendungsfall im Vergleich zum Status Quo sowie zur Erwartung; jeweils hinsichtlich Kosten, Zeitaufwand, Qualität und Dokumentation
- Bewertung der gewonnenen Ergebnisse
- Beurteilung und Analyse des Gesamtablaufes je Anwendungsfall
- Konzept und exemplarische Integration von Bestandssystemen des AG (ÖBB oder ASFINAG)
- Erarbeitung von Verbesserungs- und Entwicklungsmöglichkeiten
- Konzeptionelle Anpassung der Technik, des Ablaufes, etc. auf Basis der im Zuge der Evaluierung erkannten Verbesserungspotenziale in den Gesamtabläufen
- Abschluss der Evaluierung und Ausarbeitung von Handlungsempfehlungen

Methode:

- Evaluierung Einsatzergebnisse a) bis d) und Konzeptoptimierung aus AP2 für alle Fälle

Meilensteine, Ergebnisse und Deliverables:

M6 Anwendungskonzept und Guideline für die Sensorausstattung und den effizienten Einsatz von Hochleistungsdrohnen in der Bauwerks- und Streckeninspektion sowie der Aufklärung, Erfassung und Minimierung von Naturgefahren sowie außergewöhnlichen Ereignissen

* Falls nicht anders spezifiziert für alle Punkte der Ausschreibung 2.3.6 A) bis D)

Tabelle 12: Arbeitspaketbeschreibung AP5 – Ergebnisaufbereitung, Vergleich und Berichtslegung

AP Nr.	05	Titel des AP:	Ergebnisaufbereitung, Vergleich und Berichtslegung
Beteiligte Organisation/en (Einzelbieter oder (im Falle einer ARGE) die betreffenden ARGE- und Anzahl der Personenmonate/Organisation.			
ARGE Organisation		AP Rolle	Personenmonate
BLADESCAPE		Mitarbeit	2,3
BOKU IKI		Leadpartner	2,9
IQSOFT		Mitarbeit	1,5

Ziele:

Nutzen-/Kosten Vergleich der Ergebnisse aus der Analyse der konventionellen Ansätze mit den Ergebnissen des optimierten Konzeptes für den Einsatz von Hochleistungsdrohnen für alle Anwendungsfälle von Inspektion und Erfassung für A) bis D) sowie den Anwendungsbeispielen mit Empfehlungen mit:

1. Proof of Concept (Alle Anwendungsfälle)
2. Proof of Application (Anwendungsbeispiele)
3. Proof of Economic Efficiency (Einsatzempfehlungen)
4. Proof of Integration (Schnittstellen, Infrastrukturmanagementsysteme AG)

Beschreibung der Inhalte:

- Evaluierung der Ergebnisse und des Gesamtablaufes
- Darstellung methodische Herangehensweise und Anwendungsfelder (Proof of Concept)
- Zusammenfassung Ergebnisse Anwendungsbeispiele (Proof of Application)
- Wissenschaftliche Gegenüberstellung Systeme und NKU (Proof of Economic Efficiency)
- Vorgehensweise und Methodik Datenaufbereitung mit Beschreibung Schnittstellen Datenaufbereitung 3d – Modelle, Karten, Einspielen in Datenbanken (Proof of Integration)
- Zusammenfassen der Projektdokumentation und Abschluss Datenbank
- Zusammenfassung Ergebnisse mit Schlussbericht und Abschlusspräsentation des Gesamtprojektes

Methode:

- Zusammenfassung Ergebnisse aus AP1 bis AP 4 mit Bericht und Vergleich

Meilensteine, Ergebnisse und Deliverables:

M7 Proof of Concept, Application, Economic Efficiency and Integration in der Bauwerks- und Streckeninspektion sowie der Aufklärung, Erfassung und Minimierung von Naturgefahren und außergewöhnlichen Ereignissen bei Einsatz von Hochleistungsdrohnen. Darüber hinaus Abschätzung des Aufwandes und Nutzens für eine flächendeckende Anwendung sowie der notwendigen Schritte zu einer Standardisierung und Normung der Erfassungsmethodik.

Tabelle 13: Arbeitspaketbeschreibung AP6 – Projektmanagement

AP Nr.	06	Titel des AP:	Projektmanagement
Beteiligte Organisation/en (Einzelbieter oder (im Falle einer ARGE) die betreffenden ARGE- und Anzahl der Personenmonate/Organisation.			
ARGE Organisation		AP Rolle	Personenmonate
BLADESCAPE		Mitarbeit	1,8
BOKU IKI		<i>Leadpartner</i>	1,0
IQSOFT		Mitarbeit	0,25

Ziele:

Das Ziel ist die effiziente Steuerung des Projektes und aller Abläufe innerhalb des geplanten zeitlichen, technischen und finanziellen Rahmens sowie laufende Abstimmung mit Projektpartnern und Auftraggebern für ein optimales Gesamtergebnis.

Beschreibung der Inhalte:

Neben den klassischen Inhalten des Projektmanagements (Projektstart, Projektdokumentation, Projektkoordination, Projektcontrolling, Projektabschluss) ist bei diesem Projekt die Praxisorientierung mit der Wissenschaft zusammenzuführen. Das Ziel des Projektes sind die wissenschaftlich fundierten Anwendungsempfehlungen für die unmittelbare praktische Anwendung. Die Partnerzusammensetzung spiegelt diese Kombination wider und birgt enormes Potenzial in sich. Die Aufgabe des Projektmanagements wird es gemeinsam mit den Projektpartnern sein, von Beginn für diese Zusammenarbeit optimale Bedingungen zu schaffen und die Mitwirkenden auf die gemeinsamen Schritte einzuschwören.

Methode:

- Standardisierte Ansätze in Projekt- und Zeitmanagement
- Lösungsorientierte Herangehensweise und Kommunikation
- Konsensorientierte Umgangsweise und konsequente Umsetzung

Meilensteine, Ergebnisse und Deliverables:

M8 Projektfortschrittsbericht, Leistungsnachweise, Meeting - Minutes, Zeitpläne, Projekt-abrechnung sowie Qualitätssicherung Arbeitspakete AP1 – AP5 sowie Milestones M1-M7

1.5 Projektfortschritt und Budgetplan (Zwischenbericht)

Insgesamt befindet sich das Projekt RISKMON trotz einiger ablauftechnischer Anpassungen im Plan und ist das Umsetzen des Projektes gemäß beauftragtem Zeit- und Budgetplan zu erwarten. Die Breite der Anwendungsbereiche und die derzeit sehr dynamischen Entwicklungen im Untersuchungsbereich fordern dem Projektteam hohe Aufmerksamkeit und hohes Engagement ab um das dem Projektziel entsprechende und weit über die Landesgrenzen hinaus richtungsweisende Ergebnis zu erarbeiten.

1.5.1 Die wesentlichen Projektanpassungen im Überblick

- Verzögerter Projekt-Kick-Off der Arbeitsgruppen mit 20. bzw. 28. November 2017 aufgrund schwieriger Terminfindungen und zusätzlich aufgenommener Mehrleistungen (Labortests)
- Infolge dessen geringfügige Anpassung des Terminplanes der Arbeitspakete II und III, allerdings ohne Auswirkungen auf den Endtermin
- Aufnahme zusätzlicher Laborversuche im Projekt, um die Leistungsfähigkeit von Sensoren und der Validität der Ergebnisse dokumentiert nachvollziehen zu können
- Angestoßen durch die Auftraggeber wurden im Konsortium die Grundlagen der praktischen Anwendungen, deren Wechselwirkungen und die allfälligen Auswirkungen durch die zusätzlichen Laborversuche intensiv geprüft. Obwohl nicht hundertprozentig eine Verbesserung bzw. Anpassung der erarbeiteten Gerätesettings zu erwarten ist, wollten die Konsortialpartner auf die Möglichkeit Rücksicht nehmen und haben einen Teil der Durchführung der praktischen Anwendungen um einige Monate verschoben. Eine wesentliche Prämisse dabei war, dass der Gesamtzeitplan nicht massiv verzögert wird. Dementsprechend wurde die Zustimmung eines Kunden eingeholt, um dessen Daten als Testbasis für Analyse-Algorithmen und zur strukturellen Prozessierung heranziehen zu können (zusätzlich zu den vorhandenen ASFINAG-Daten) und andererseits einige Aufgaben im zeitlichen Ablaufplan nach vorne gezogen. Diese Maßnahmen ermöglichen aus heutiger Sicht die Einhaltung des Projektzeitplanes und bei den Anwendungen jeweils ein auf Basis der Labortests beruhendes optimiertes Gerätesetting.

Nachstehende Darstellung zeigt im Überblick den Stand der Arbeitspakete per Ende September 2019:

1.5.2 Arbeitspaket II - Analyse Erfassungsmethoden im Überblick

Ziele:

bis Ende Jänner 2019

Systematische Analyse konventioneller Methoden und Parameter in der teilautomatisierten Inspektion von Bauwerken und Strecken sowie der Erfassung und Minimierung von Naturgefahren und außergewöhnlichen Ereignissen als Basis für Konzepterstellung (AP3) und Vergleich.

Tabelle 14: Übersicht Arbeitspaket II - Analyse Erfassungsmethoden

Inhalte:

- Ü **Systematische Analyse** der verwendeten Methoden, Geräte und Sensoren sowie Parameter in Monitoring und periodischer Zustandserfassung von **Bauwerken und Strecken**
- Ü Systematische Analyse der Erfassung potenzieller **Naturgefahren** sowie den Einsatzerfordernissen und Prozessen im Fall **außergewöhnlicher Ereignisse**
- Ü **Detailanalyse** (SWOT) der Erhebungen, Aufwendungen und Ergebnisse in den Anwendungsfällen A) Bauwerksinspektion, B) Naturgefahren, C) Streckeninspektion; D) Außergewöhnliche Ereignisse
- Ü Einheitliche Darstellung der Ergebnisse als Basis für die **Konzeption der Vorgehensweisen** in Inspektion und Erfassung sowie der Gegenüberstellung in einer **Nutzen-/Kosten Analyse**
- Ü Analyse der führenden **Bestandssysteme** der AG

1.5.3 Arbeitspaket III – Konzeption Einsatz & Datenanalyse im Überblick

Ziele:

bis Ende Juli 2019

Auswahl geeigneter Hochleistungsdrohnen, Bestückung mit Sensoren (Kamera RGB, Laserscan, Thermografie) sowie ferngesteuerter Transportvorrichtungen (Sensoren, Sprengmittel) zusammen mit geeigneter Software, Darstellungsformate und Schnittstellen bis hin zu den Anforderungen der Drohnenpiloten. Konzeption, Installation und Anpassung der notwendigen IT Systeme.

Tabelle 15: Übersichtarbeitspaket III - Konzeption Einsatz & Datenanalyse

Inhalte:

- Ü **Auswahl/ Konzeption** des geeigneten **Fluggerätes** bzw. der mobilen Einheiten und **Sensoren**
- Ü Auswahl/ Konzeption der geeigneten **Softwaretools** zur Datenaufbereitung und –analyse
- Ü Installation und Anpassung/Konzeption der notwendigen **IT Systeme**
- Ü Auswahl/Konzeption der geeigneten **Darstellungsform** der Ergebnisse
- Ü Definition des Datenformates und Form der **Ergebnisübergabe**
- Ü Erarbeitung der Anforderungen an die **Piloten**
- Ü Erarbeitung/Konzeption der benötigten **Bewilligungen** und Auswahl der **Versicherungen**
- Ü Erarbeitung/Konzeption der Prozesse und **Verantwortlichkeiten** (Standardisierung)
- Ü Ausarbeitung des erwarteten **Effizienzpotenzials** je Anwendungsfall zum Status Quo hinsichtlich **Kosten, Zeitaufwand, Qualität** und Dokumentation, sowie Ausblick weiterer Anwendungsfelder

1.5.4 Arbeitspaket IV – Umsetzung der Anwendungsfälle im Überblick

Ziele:	bis Ende Sep 2019
Umsetzung Anwendungsfälle von Inspektion und Erfassung mit den Schwerpunkten: <ol style="list-style-type: none"> 1. <u>Inspektion</u>: 2x Bauwerke & Schutzbauten, 2 Streckenabschnitte 2. <u>Aufklärung</u>: Live & Aufklärung 2x Naturgefahren, 2x Ereignis 3. <u>Action</u>: Ausbringung Sensoren (Lawine/Rutschhang), Lawinensprengung 4. <u>Datenmanagement</u>: Speicherung und Aufbereiten der Datenlieferungen 	

Tabelle 16: Übersicht Arbeitspakete IV - Umsetzung der Anwendungsfälle

Inhalte:

- Ü Auswahl der konkreten **Testobjekte**
- Ü Ausarbeitung **Gesamtablauf** inkl. Zeitplan je Anwendungsfall
- Ü **Durchführungsvorbereitungen**
- Ü **Durchführung** der praktischen Anwendungen
- Ü **Datenmanagement** und Aufbereitung der Daten
- Ü Auswertung und **Datenanalyse**
- Ü Ausfertigung eines **Ergebnisberichtes**
- Ü Ausarbeiten von **Handlungsempfehlungen**

1.5.5 Arbeitspaket V –Ergebnisevaluierung & Optimierung im Überblick

Ziele:	bis Ende Sep 2019
Entwicklung eines anwendbaren optimierten Konzeptes für den Einsatz von Hochleistungsdrohnen für alle Anwendungsfälle von Inspektion und Erfassung für alle Kategorien	

Tabelle 17: Übersicht Arbeitspakete V – Evaluierung der Ergebnisse & Konzeptoptimierung

Inhalte:

- Ü **Evaluierung** der Ergebnisse und Bewertung der gewonnenen Ergebnisse
- Ü Ausarbeitung des **Effizienzsteigerungspotenzials** je Anwendungsfall im Vergleich zum Status Quo sowie zur Erwartung hinsichtlich Kosten, Zeitaufwand, Qualität und Dokumentation
- Ü Beurteilung und Analyse des **Gesamtablaufes** je Anwendungsfall
- Ü Konzept und exemplarische Integration in die **Bestandssysteme** der Auftraggeber
- Ü Erarbeitung von Verbesserungs- und **Entwicklungsmöglichkeiten**
- Ü Konzeptionelle **Anpassung** der Technik, des Ablaufes, etc. auf Basis der im Zuge der Evaluierung erkannten Verbesserungspotenziale in den Gesamtabläufen
- Ü Ausarbeitung von **Handlungsempfehlungen**

1.5.6 Arbeitspaket IV – Ergebnisaufbereitung und Bericht im Überblick

Ziele:	bis Ende Sep 2019
Nutzen-/Kosten Vergleich der Ergebnisse aus den Ergebnissen der optimierten Konzepte für alle Anwendungsfälle mit Empfehlungen	

Tabelle 18: Übersicht Arbeitspakete VI – Ergebnisaufbereitung, Vergleich und Berichtslegung

Inhalte:

- Ü Evaluierung der **Ergebnisse** und des Gesamttablaufes
- Ü Darstellung methodische Herangehensweise und Anwendungsfelder (**Proof of Concept**)
- Ü Zusammenfassung Ergebnisse Anwendungsbeispiele (**Proof of Application**)
- Ü Wissenschaftliche Gegenüberstellung Systeme und NKU (**Proof of Economic Efficiency**)
- Ü Vorgehensweise und Methodik Datenaufbereitung mit Beschreibung Schnittstellen
Datenaufbereitung 3d – Modelle, Karten, Einspielen in Datenbanken (**Proof of Integration**)
- Ü Zusammenfassen der **Projektdokumentation** und Abschluss Datenbank
- Ü Zusammenfassung Ergebnisse mit **Schlussbericht** und **Abschlusspräsentation** des Gesamtprojektes

1.5.7 Projektzeitplan & Projektbudget

Eine geringfügige Verlängerung der Projektlaufzeit von Ende September 2019 bis Ende November 2019 ist im Wesentlichen durch die schwierigen Terminfindungen im Projekt, sowie durch die ergänzend aufgenommenen und für die Auftraggeber kostenneutralen Labortests und die dadurch verzögerte Durchführung der operativen Testanwendungen begründet. Die doch zum Teil sehr umfangreichen Mehrleistungen und Verzögerungen konnten durch eine Optimierung der Prozesse und Zuordnung von mehr Ressourcen nahezu zur Gänze kompensiert werden. Der qualitative Mehrwert der Ergebnisse hat diese Projekterweiterung jedenfalls gerechtfertigt.

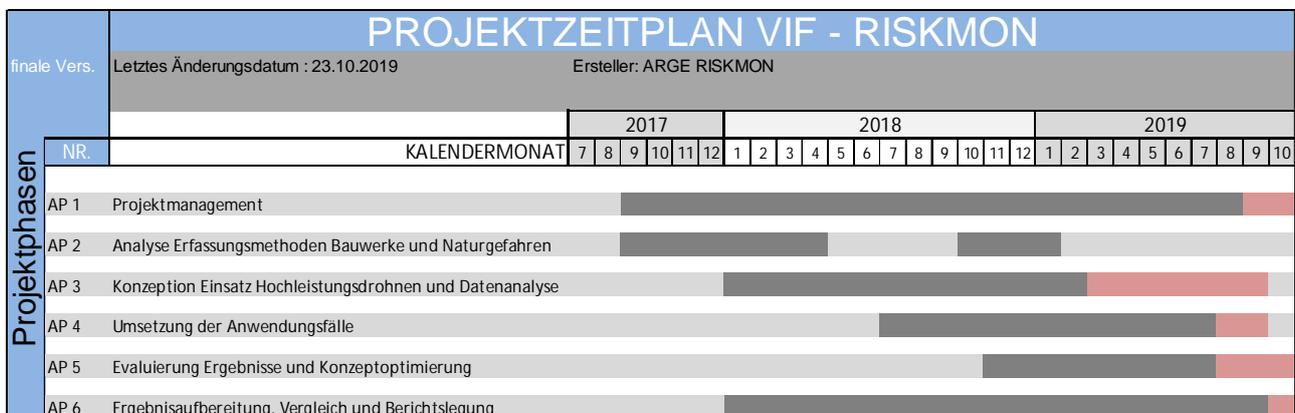


Abbildung 2: Projektzeitplan RISKMON

Die Ergänzung des Projektes durch Labortests sowie die darauf abgestimmte Anpassung des Zeitplanes zur Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Tests, führten zu einer Erhöhung des Projektaufwandes, welcher allerdings seitens der Auftragnehmer getragen wurde und es somit für die Auftraggeber zu keiner Veränderung des Gesamtbudgets und der Budgetstruktur insgesamt gekommen ist. Dementsprechend kann das Projektbudget gemäß nachstehendem Auszug aus dem FFG VIF E-Call unverändert abgeschlossen werden.

Konsortialübersicht							
Meine Organisation		BOKU Wien, Inst. f. konstruktiven		IQSOFT Ges. für Informationstechnologi			
Übersicht	Personalkosten	Kostenkategorie	Finanzierung	Kosten nach AP			
Arbeitspaket	Personalkosten	Anlagennutzung	Sachkosten	Drittkosten	Reisekosten	Umsatzsteuer	Summe
1. Projektmanagement	38.725,00 €			•			•
2. Analyse Erfassungsmethoden	66.123,60 €			•		•	•
3. Konzeption Einsatz Hochleistungsdrohnen & Datenanalyse	54.863,60 €			•	•	•	•
4. Umsetzung der Anwendungsfälle	140.607,80 €			•	•	•	•
5. Evaluierung Ergebnisse & Konzeptoptimierung	57.843,00 €			•	•	•	•
6. Ergebnisaufbereitung, Vergleich & Berichtslegung	95.624,60 €			•	•		•
Summe	453.788 €	0 €	24.200 €	15.400 €	5.612 €	77.800 €	576.800 €
Partner	AP 1	AP 2	AP 3	AP 4	AP 5	AP 6	Summe
Meine Organisation	•	•	•	•	•	•	278.400 €
BOKU Wien, Inst. f. konstruktiven Ingenieurbau (BOKU-IKI)	•	•	•	•	•	•	110.000 €
IQSOFT Ges. für Informationstechnologie mbH	4.200,00 €	16.800,00 €	24.360,00 €	61.030,00 €	26.250,00 €	24.360,00 €	188.400 €
Summe	•	•	•	•	•	•	576.800 €

Abbildung 3: Budgetübersicht RISKMON

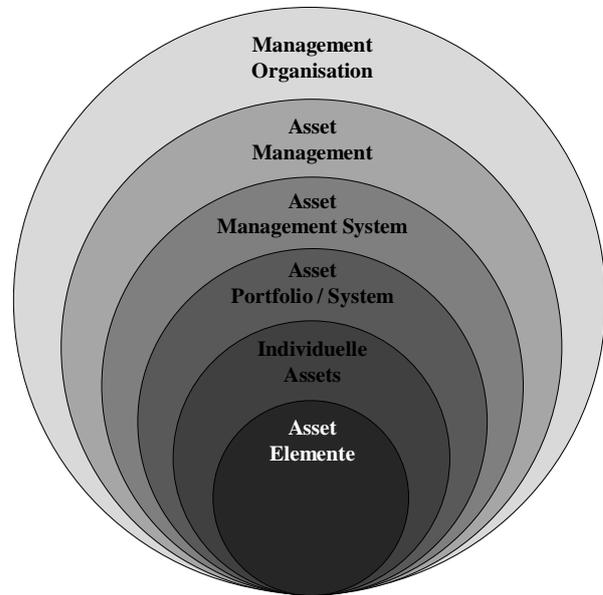
2 Stand Technik und Wissenschaft

2.1 Überblick Asset Management

Asset Management (AM) erlaubt generell die Realisierung von Werten („creation of value“) aus physischen und nicht physischen Anlagen („assets) gemäß den Zielen und Erwartungen der handelnden („decision maker“) bzw. betroffenen Personen („stakeholder“). Was als Wert angesehen wird, hängt von der Art der Anlagen sowie den angestrebten Zielen ab. Ein Asset Management System (AMS) ist demgemäß ein strukturierter Zugang zu Entwicklung, Koordination und Kontrolle von Aktivitäten in unterschiedlichen Stadien des Lebenszyklus von Anlage(-güter)n bzw. Assets im Portfolio in Hinblick auf eine optimale Erreichung der angestrebten Ziele. Ausgehend von den einschlägigen Normen (ISO 50.000) und der Literatur zeigt Abbildung 4 wesentliche Begriffe des Asset Managements¹⁹.

Für Investitionen in physische Assets sind analog zu finanziellen Assets Entscheidungen hinsichtlich Kauf/Bau, Halten/Erhalten und Verkauf/Auflassung zu treffen. Im Gegensatz zur Maximierung der Rendite von Finanzassets steht jedoch für Verkehrsanlagen ihre (sicherheits-)technisch und wirtschaftlich optimale Funktionsfähigkeit im Vordergrund. Weiters sind Verkehrsanlagen im Unterschied zu örtlich und zeitlich schnell transferierbaren Geldwerten, Aktien, Optionen oder Anteilen ortsgebunden und aufgrund der Bauzeit sowie Lebensdauer zeitlich sehr eingeschränkt disponierbar. In einem ausreichend diversifizierten Portfolio wird selbst der Totalausfall eines Investments das Gesamtergebnis nur geringfügig verändern bzw. wird dieses durch Einnahmen aus anderen Assets ausgeglichen (Zentraler Grenzwertsatz). Der Ausfall einer wesentlichen Anlage wie z.B. einer Brücke oder eines Tunnels können hingegen den Ausfall der Verbindungsfunktion sowie der diesbezüglichen Einnahmen auf der gesamten Route zur Folge haben. Ein weiterer zentraler Unterschied zwischen finanziellen Assets und physischen Assets wie die Verkehrsinfrastruktur ist die monopolartige Marktsituation sowie die unmittelbare Bedeutung für die Funktion von Standorten. Vorgaben z.B. hinsichtlich Art, Umfang und Häufigkeit von Zustandserfassungen, einzuhaltender Grenzwerte sowie Risiken können aufgrund der Folgen für die Allgemeinheit nicht allein einem profitorientierten Markt überlassen werden.

Vom Management der Organisation bis zu den Elementen einzelner Assets gemäß ISO 55.000:2014



Asset Element: (Un-)abhängiges funktionales Teilelement eines Asset bzw. einer Anlage

Individuelle Assets: (Un-)abhängige Anlagen in einem Portfolio bzw. Teile eines funktionierenden Systems

Asset Portfolio/System: Alle Anlagen oder Teile des Systems im Anwendungsbereich eines Asset Management Systems

Asset Management System: Zusammenhängende Strategien, Methoden und Bausteine zur Erreichung gesetzter Ziele

Asset Management: Alle koordinierten Aktivitäten natürlicher und juristischer Personen zur Realisierung von Werten aus Assets

Management Organisation: Die der Funktion und Erfüllung der Ziele von Organisationen dienenden, koordinierten Aktivitäten

Abbildung 4: Stellung und Zusammenhänge zwischen Schlüsselbegriffen gemäß ISO 55.000, 55.001 und 55.002 im Asset Management

¹⁹ vgl. ISO 55.000 Series – Asset management; ISBN 978 0 580 86467 4; SI-6; HOFFMANN, M. (2018) S63-76

Das Transport Infrastructure Asset Management wird durch klare Zielsetzungen langfristig geleitet. Der grundlegende Ansatz besteht in einer Verbindung der Anforderungen der Stakeholder an den Zustand, die Performance und Verfügbarkeit der Straßenanlagen mit dem Management dieser Anlagen und den dazu erforderlichen Investitionsentscheidungen. Ausgehend von einem faktenbasierten, breiten Zugang soll eine effektive Ressourcenallokation und Umsetzung mit dem Ergebnis einer größtmöglichen Nutzersicherheit und -zufriedenheit sowie Effizienz erreicht werden. Die daraus abgeleiteten Kernprinzipien lauten wie folgt:

- **Klare Zielsetzungen:** Entscheidungen zu einer effizienten Ressourcenallokation erfordern klar definierte und messbare Ziele
- **Messbare Ergebnisse:** Alle Zielsetzungen werden durch Entscheidungskriterien und Benchmarks definiert und bilden die Basis für die tägliche Arbeit und strategische Entscheidungen
- **Vergleich von Alternativen:** Effiziente Ressourcenallokation beruht immer auf einem Vergleich von Investitionsalternativen und ihren Auswirkungen auf die definierten Ziele
- **Valide Entscheidungsgrundlagen:** Die Bewertung von Handlungsoptionen erfolgt immer auf Basis aktueller und belastbarer Datengrundlagen
- **Kontrolle schafft Verantwortlichkeit:** Die erzielten Resultate auf allen Handlungsebenen werden evaluiert und schaffen die Basis für ein verantwortungsvolles Handeln der Beteiligten

Die Transport Infrastructure Asset Management Hierarchie orientiert sich an den realen Strukturen der Infrastrukturbetreiber und ihren Aufgaben auf Strategieebene, Managementebene und Umsetzungsebene. Je höher die Entscheidungsebene, um so aggregierter sind die Informationen und umso größer ist die Tragweite von Entscheidungen.

- **Strategieebene (Gesamtnetz):** In der obersten Entscheidungsebene werden die Ziele und Strategien festgelegt. Auf Basis generalisierter Analysen und Benchmarks zu den wichtigsten Vorhaben erfolgt die Festlegung des Budgets, werden Richtungsentscheidungen getroffen und Leitprojekte steuern verfolgt
- **Managementebene (Assetklassen):** Auf der mittleren Entscheidungsebene sind detailliertere Entscheidungsgrundlagen zu Investitionsstrategien basierend auf einem anlageübergreifenden Lebenszykluskostenansatz erforderlich. Diese Entscheidungsebene ist für spezifische organisatorische Felder wie Planung, Bau oder Erhaltung zuständig und dafür verantwortlich, die Investitionsstrategien von der Netzebene auf konkrete Projekte umzusetzen
- **Umsetzungsebene (Einzelanlage, Projekte):** Auf der Umsetzungsebene braucht es klare Vorgaben für Abläufe und Vorgehensweisen auf deren Basis projektrelevante Einzelentscheidungen für konkrete Projekte zu treffen sind. Auf dieser Ebene liegt die Verantwortung für spezifische Klassen von Assets bzw. Anlagen wie Oberbau, Brücken, Tunnels und spezifische Aufgaben wie Zustandserfassung, Planung von Maßnahmen, Ausschreibung sowie Überwachung. Die erzielten Ergebnisse entscheiden sich auf dieser Ebene und sind daher maßgebend vom Verständnis und der Motivation der Beteiligten abhängig

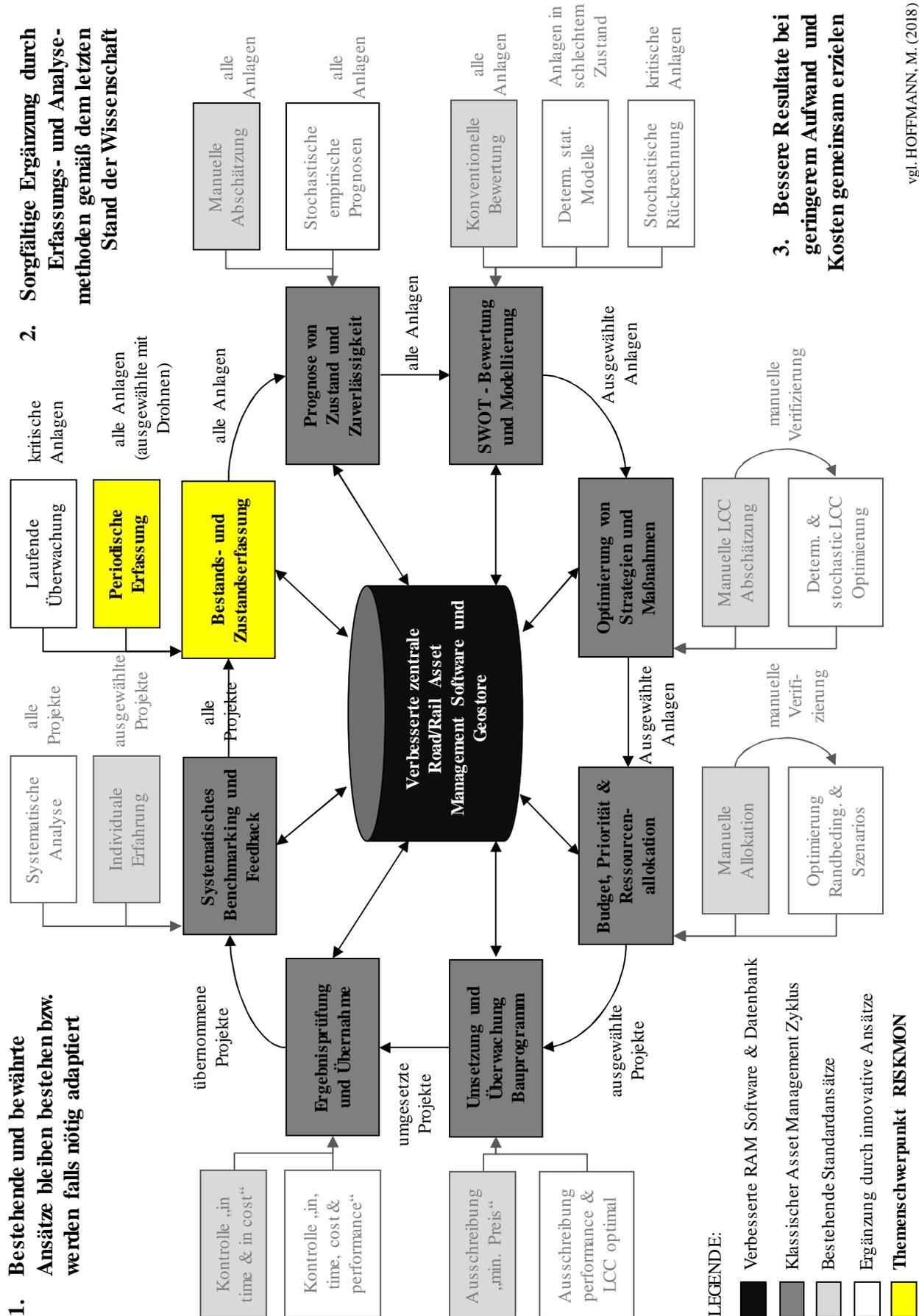
Der Transport Infrastructure Asset Management Prozess ist zyklisch aufgebaut, hierarchisch gegliedert und zielt auf eine ganzheitliche Betrachtung aller Phasen im Lebenszyklus ab. Im Sinn eines selbstlernenden Systems hat sich eine kreisförmige Vorgehensweise auf allen Ebenen bewährt, bei dem die Daten und Erkenntnisse der vorangegangenen Schritte in den jeweils nächsten Schritt einfließen. Die Umsetzung dieses Prozesses in der Organisation von Verkehrsinfrastrukturbetreibern erfolgt überwiegend erfahrungsbasiert und begrenzt standardisiert, was eine individuelle Anpassung erleichtert, aber durchgängige Automatisierung und Optimierung erschwert. Die wesentlichen Schritte in dem kreisförmigen Prozess sind (Abbildung 5):

- **Bestands- und Zustandserfassung:** Verkehrsinfrastrukturnetze sind über Jahrzehnte schrittweise gewachsen wobei sich Standards, Bauweisen und Investitionen sowie der Zustand der Anlagen im Laufe der Zeit zum Teil erheblich geändert haben. Daher ist eine umfassende Erhebung des Anlagenbestandes bzw. aller Assets nach Art, Funktion, Umfang und Zustand als Basis des Asset Management erforderlich. In der konkreten Umsetzung sind bestehende und neu erfasste Daten in eine für das Asset Management und Lebenszyklusbetrachtung geeignete Form bzw. Datenbank einzuspeisen. Zustandserfassungen sind zudem meist Momentaufnahmen und erfordern je nach Art, Häufigkeit und Detaillierungsgrad einen gewissen Aufwand, weshalb sich eine mehrstufige Herangehensweise von periodischer Erfassung aller Anlagen sowie Monitoring kritischer Anlagen bewährt hat. Die Bestands- und Zustandserfassung mittels mobiler Sensorik ist **Schwerpunkt des Forschungsprojektes RISKMON**. Der Nutzen der verwendeten innovativen Erfassungsmethoden erschließt sich jedoch erst über die Berücksichtigung von bzw. die Integration in die übrigen Prozessschritte des Asset Management
- **Prognose von Zustand und Zuverlässigkeit:** Aufgrund der langen Lebensdauer der Mehrzahl der Anlagen ist die Zustandsentwicklung der meisten Anlagen über längere Zeiträume unkritisch. Spezifische Erfassungen und Prognosen sind jedoch wesentlich für die Identifikation kritischer Anlagen, die Vorhersage von Veränderungen und Basis der Optimierung von Maßnahmenplanungen. Eine mehrstufige Herangehensweise hat dabei den Vorteil der Konzentration des Aufwandes auf Assets, an denen der größte Nutzen durch Ausnutzung bestehender Restlebensdauern oder Vermeidung von Ausfällen lukriert werden kann.
- **SWOT - Bewertung und Modellierung:** In der konventionellen Bewertung von Anlagen hat sich zur Objektivierung von Ergebnissen das „Vier Augen Prinzip“ mit interner Kontrolle und externer Prüfung bewährt. Bei empirisch-qualitativen Bewertungsansätzen besteht jedoch im Gegensatz zu Messung und Modellierung eine höhere Gefahr von Fehleinschätzungen. Aufgrund der gravierenden straf- und zivilrechtlichen Folgen von Ausfällen werden Einschätzungen tendenziell zu einer weniger effizienten Gestaltung des Lebenszyklus führen. Bei Einsatz entsprechender analytischer Methoden ist grundsätzlich ein wesentlich effizienterer Mitteleinsatz ohne erhöhtes Risiko erreichbar.
- **Optimierung von Strategien und Maßnahmen:** Die Ableitung von Erhaltungsstrategien und konkreter Maßnahmen im Einzelfall erfolgt überwiegend auf Basis bisher bewährter Vorgehensweisen und Maßnahmen. Eine analytische Betrachtung erlaubt hingegen eine Optimierung von Maßnahmenwahl, Eingriffszeitpunkt und Bauloslänge unter Unsicherheit. Es kann gezeigt werden, dass eine analytische Optimierung verbunden mit einer manuellen Anpassung und Validierung zu einem effizienteren Ressourceneinsatz führt.
- **Budget, Prioritäten und Ressourcenallokation:** Im Gegensatz zu privatwirtschaftlich orientierten Betreibern weisen Budgetierung und Prioritäten hoheitlich dominierter Verkehrsinfrastrukturbetreiber gemeinwirtschaftliche und politische Komponenten auf. Die Ausgaben und Einnahmen der Vergangenheit zusammen mit Zielerreichung und Zustandsentwicklung sind dabei übliche Maßstäbe der Beurteilung. In Abhängigkeit von Alters- und Zustandsverteilung es zu erheblichen Abweichungen zwischen theoretischem Bedarf und tatsächlichen Ausgaben kommen. Die Ressourcenallokation innerhalb des Budgets erfolgt üblicherweise nach Sachbereichen bzw. Projekten und ihrer Priorität, bis das Budget eines Jahres aufgebraucht ist. Die verbleibenden Projekte werden dann in den Folgejahren zusammen mit neu hinzukommenden Vorhaben abgearbeitet²⁰.

²⁰ vgl. *HOFFMANN, M. et al. (2012); HOFFMANN, M. (2018) S63-76*

- **Umsetzung und Überwachung Bauprogramm:** Die Ausschreibung ausgewählter Bauvorhaben gemäß dem Bauprogramm erfolgte bisher weitgehend nach dem niedrigsten Preis innerhalb vorgegebener Anforderungen (Funktion, Baudauer etc.). Eine performanceorientierte Ausschreibung hinsichtlich Lebensdauer und minimaler Lebenszykluskosten erfordert entsprechend abgesicherte Zustandsfunktionen und Referenzzyklen um innerhalb der Gewährleistungszeiträume belastbare Aussagen zu treffen. Da diese Grundlagen jedoch nur in Ausnahmefällen vorhanden sind, begrenzt dies naturgemäß Ausschreibungen nach dem Bestbieterprinzip in der Praxis.
- **Ergebnisprüfung und Übernahme:** Der Schwerpunkt interner Kontrollen von Infrastrukturbetreibern erfolgt projektbegleitend bzw. bei der Projektabnahme oder Ende der Gewährleistungsfrist, während externe Kontrollen in der Regel nach Projektabschluss eingeleitet werden. Demgemäß konzentrieren sich herkömmliche Kontrollen auf Umsetzung in Zeitrahmen, Kosten und Zustand bei Übergabe. Mit den entwickelten Referenzmodellen für Zustandsentwicklung, Kostenverteilung und Lebenszykluskosten können performanceorientierten Abzügen oder Zuschläge aufgrund abgesicherter Prognosen bzw. Lebenszykluskosten zum Ende der Gewährleistung erfolgen.
- **Systematisches Benchmarking und Feedback:** Systematisches Controlling und Benchmarking haben in der Vergangenheit an Bedeutung gewonnen, werden aber meist sachbezogen oder im Anlassfall für Einzelprojekte durchgeführt. Grundsätzlich bietet jedes umgesetzte (Investitions-)Vorhaben die Möglichkeit einer individuellen Weiterentwicklung der Beteiligten. Für ein funktionierendes Asset Management auf Basis aktueller Eingangsdaten ist jedoch eine systematische Sicherung und Analyse erzielter Ergebnisse entscheidend. Hier liegt auch der besondere Vorteil einer Implementierung messtechnischer Ansätze im Asset Management, weil dies im Gegensatz zu subjektiven Bewertungen und Einzelbeurteilungen eine automatische, selbstlernende Aktualisierung sowie Verbesserung der Ergebnisse erlaubt.

Allgemein ergibt sich in Bezug auf den Einsatz moderner Messtechnik bzw. mobiler Sensorik die Frage nach der grundsätzlichen Machbarkeit in der Anwendung und Verarbeitung der Daten sowie den sich daraus ergebenden Zusatzinformationen für Investitionsentscheidungen. Die Fragen der grundsätzlichen Machbarkeit und der möglichen Zusatzinformationen werden üblicherweise im Rahmen von Pilotprojekten beantwortet. Aufgrund einer fehlenden Standardisierung, Effizienz sowie ungelöster Fragen in Bezug auf den Zusatznutzen sowie Integration in Bestandssysteme ist der Einsatz moderner Messtechnik in der Praxis der Ausnahmefall. Wie noch gezeigt wird, macht es keinen Sinn nur den Aufwand einer herkömmlichen Bestands- und Zustandserfassung mit dem Aufwand für moderne Messtechnik zu vergleichen. Vielmehr ist zu fragen, wie moderne Messtechnik so praktisch einsetzbar ist, dass sich daraus ein entsprechender Mehrwert über bessere Investitionsentscheidungen im Verhältnis zu den Kosten im Lebenszyklus ergibt. Gemäß den Zielsetzungen des Forschungsprojektes RISKMON (Kap. 1.2) wird daher anhand der Anwendungsfälle gezeigt, wie die Informationen in (erweiterte) Bestandssysteme des Asset Management integrierbar sind, wann und wo ein Einsatz sinnvoll ist und welcher Zusatznutzen sich im Einzelfall bzw. auf Netzebene daraus ergeben kann.



vgl. HOFFMANN, M. (2018)

Abbildung 5: Überblick Transport Infrastructure Asset Management Zyklus mit Integration moderner LCC – Entscheidungsinstrumente und Schwerpunkt im Forschungsprojekt RISKMON

2.2 Standards Zustandserfassung

2.2.1 Bauwerke

Allgemeines: Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur wie Brücken, Tunnels oder Mauern werden durch Verkehr, Witterung, Betrieb (Winterdienst) und Naturgefahren beansprucht. Dementsprechend kommt es zu Abnutzung und Alterung mit kontinuierlich oder plötzlich auftretenden Schadensbildern ohne/mit Auswirkungen auf Funktion, Sicherheit und Dauerhaftigkeit. Ohne regelmäßige Zustandserfassung und Bewertung kann demgemäß einer sich abzeichnenden Zustandsverschlechterung bis zu einem Bauwerksversagen nicht effizient begegnet werden. In der Anwendungspraxis reicht die Bandbreite von keiner Erfassung zu erfahrungsbasierten unsystematischen Einschätzungen bis zu systematischen Schadenskatalogen und messtechnischen Aufnahmen. Die Aufgabe von Schadenskatalogen und standardisierten periodischen Zustandserfassungen besteht nunmehr darin, regelmäßig auftretende Schadensmerkmale mit Ursachen, möglichem Schadensverlauf und Folgen für Nutzbarkeit und Lebensdauer nachvollziehbar zu erfassen. Inspektions- und Prüfanweisungen für Bauwerke können zu diesem Zweck neben Anforderungen an Erfassungspersonal, Art und Häufigkeit der Erfassung auch katalogartige Schadensbeschreibungen bis auf Elementebene enthalten.

Generell sind Bauwerke baulich so auszubilden und zu gestalten, dass die Überwachung und Prüfung sowie die erforderliche Wartung und Instandhaltung jederzeit sicher, einfach und wirtschaftlich durchgeführt werden kann. Die Erhebung des Zustandes erfolgt, um Mängel und allfällig eintretende Schäden rechtzeitig zu erkennen und zu beheben, bevor größere wirtschaftliche Schäden eintreten oder die Verkehrssicherheit beeinträchtigt wird. Unter Zustandserfassung im Bauwerksmanagement werden allgemein visuelle, messtechnische und experimentelle Erfassungen von Mängeln und Schäden sowie deren Beurteilung hinsichtlich Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit und Standsicherheit verstanden. Die Verkehrssicherheit ist gegeben, wenn von dem Bauwerk keine Gefährdung ausgeht, die Funktion erfüllt und eine gefahrlose Nutzung möglich ist. Die Dauerhaftigkeit wird als gegeben angesehen, wenn die Anlage keinen progressiven Schädigungsverlauf aufweist und die erwartete Nutzungsdauer bei Umsetzung erforderlicher (Instandhaltungs-)Maßnahmen erreicht wird. Die Standsicherheit ist gegeben, wenn die Anlage und ihre Elemente ausreichend tragfähig sind, um die planmäßigen Lasten gemäß der Dimensionierung bzw. einer allfälligen Lastbeschränkung zuverlässig aufzunehmen.²¹

Für eine effiziente Zustandserfassung hat sich international ein abgestuftes System mit laufender Überwachung, periodischen Kontrollen und (externen) Prüfungen bewährt (Abbildung 6). Das Ziel visueller Erfassungen ist eine standardisierte, augenscheinliche und schnelle Erfassung vorhandener Schäden mit begrenztem Aufwand. Visuelle Erfassungen werden mittels Gedächtnisnotiz, Checklisten, Fotos und Kurzbeschreibung periodisch durchgeführt und ermöglichen eine qualitative subjektive Indikation von Schäden, die Feststellung erforderlicher Sofortmaßnahmen sowie eines vertieften Prüfbedarfes. Messtechnische Erfassungen erlauben zerstörende bzw. zerstörungsfreie permanente (Monitoring) oder periodisch wiederholbare Aufnahmen von Ausmaß und Schwere von Schäden für die Beurteilung, Zustandsprognosen sowie von Materialparametern für die Nachrechnung von Anlagen. Die Zielsetzung weitergehender experimenteller Methoden sind die Entwicklung und Erprobung neuer Ansätze der Zustandserfassung (z.B. Weigh in Motion, Drohneneinsatz, Thermografie etc.) für die Erfassung spezifischer zusätzlicher Daten an ausgewählten Anlagen. Sind diese Methoden zudem effizient und wiederholt einsetzbar, können sie bei entsprechender Standardisierung Teil der regulären messtechnischen Erfassung werden.

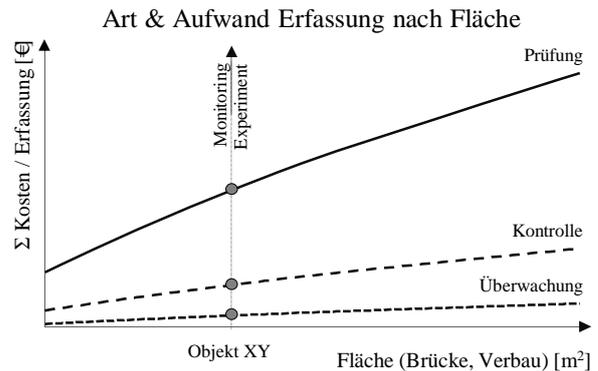
²¹ vgl. MEHLHORN, G. et al. (2014); BMVI (2017); HOFFMANN, M. (2018) S381-414

Die Schadensansprache und Bewertung wird je nach Land und Bauwerksmanagementsystem (BMS) mittels kurzer verbaler Beschreibung bis hin zu umfassenden Schadenskatalogen für jeden Bauwerkszustand auf Elementebene illustriert. Abgesehen von den USA (10 Stufen NBI bzw. 4 Stufen AASHTO) bzw. Japan (0-100 Punkte, 5 Klassen J-BMS) kommen in dem überwiegenden Anteil der entwickelten Länder Notensysteme mit fünf Zustandsnoten zum Einsatz. Die Zustandserfassung und Bewertung von Brücken in Österreich (Tabelle 19 bis Tabelle 21) erfolgt ebenfalls in 5 Zustandsnoten von sehr gut (Note 1) bis sehr schlecht (Note 5). Für eine möglichst einheitliche Schadensansprache werden die Brückenprüfer in Österreich regelmäßig geschult, ein standardisierter Schadenskatalog ist jedoch im Gegensatz zu anderen Ländern nicht in Verwendung. Dafür finden eine Reihe von Normen und Richtlinien in der Zustandserfassung und Bewertung von Anlagen bzw. insbesondere Brücken Verwendung, die in der Folge kurz beschrieben werden:

ONR 24008 (2013): Die ONR 24008 beschäftigt sich mit der Erhaltung bestehender Straßen- und Eisenbahnbrücken. Sie regelt die Vorgehensweise zur Evaluierung der Tragfähigkeit von Brückenbauwerken sowie der Erkennung möglicher Beeinträchtigungen der Zuverlässigkeit. Weiters wird definiert, unter welchen Umständen die Notwendigkeit zur Bewertung der Tragfähigkeit besteht und welche Punkte eine Zustandsaufnahme beinhalten soll. Neben Materialkennwerten und Werkstoffuntersuchungen beinhaltet sie Angaben zur Vorgehensweise der Untersuchung, der Zustandsbewertung und insbesondere der rechnerischen Nachweise der Tragfähigkeit samt qualitativer Beurteilung. Als wesentlicher Teil einer Tragwerksbeurteilung ist in der ONR 24008 auch der erforderliche Inhalt einer Dokumentation einer solchen Beurteilung angeführt (Austrian Standards Institute, 2013)

Richtlinie zur Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton: Die von der österreichischen Bautechnik Vereinigung herausgegebene Richtlinie spielt ebenso eine wichtige Rolle zur Durchführung von Inspektionen und Monitoring an Brücken. Wie auch in der ONR 24008, werden in dieser Richtlinie Vorgehensweisen für die Zustandserhebung und Schadensbeurteilung von Bauwerken festgelegt. Im Anhang sind mögliche Schäden am Beton und Stahlbeton mit Bewertungsvorschlägen (Note 1-5) beschrieben, die es ermöglichen anhand der erhobenen Daten eine Aussage über den Zustand des Bauwerks/Bauteils zu treffen.

Arten & Intervalle der Zustandserfassung von Brücken mit Überwachung, Kontrolle und Prüfung



ÜBERWACHUNG: Dient i.a. der augenscheinlichen, schnellen Feststellung von Schäden, die bei sachgemäßer Besichtigung im Zuge von Kontrollfahrten laufend erkennbar sind. Zur Begrenzung des Aufwands sind schriftliche Meldungen nur im Fall festgestellter Schäden oder Veränderungen erforderlich

KONTROLLE: Beinhaltet die Feststellung und Aufzeichnung von Schäden, Bewertung von Bauwerkszustand und Funktion, Vergleich mit vorhergehenden Bewertungen, Festlegung erforderlicher (Sofort-)Maßnahmen oder vertiefter Prüfungen mittels visueller Begutachtung durch sachkundige Personen

PRÜFUNG: Erfordert eine umfassende Erfassung, Dokumentation und Bewertung der Schäden nach Ausmaß und Schwere sowie der statischen Verhältnisse als Basis für die Beurteilung von Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit und Standsicherheit. Die erforderlichen und empfohlenen Maßnahmen sind mit Zeithorizont zu beschreiben und allfällige Sonderprüfungen zu veranlassen

Intervalle nach Erfassungsort

Land	Überwachung	Kontrolle	Prüfung
Österreich	4 Monate	2 Jahre	6 Jahre
Deutschland	4 Monate	1 Jahr	6 Jahre
Schweiz	laufend	nach Bedarf	5 Jahre
USA	6 Monate	2 Jahre	5 Jahre
Japan	laufend	2 Jahre	5 Jahre
Frankreich	12 Monate	3 Jahre	6 Jahre
England	Laufend	2 Jahre	6 Jahre
Schweden	6 Monate	3 Jahre	6 Jahre
Südafrika	12 Monate	Stichproben	5 Jahre

*vgl. RVS 13.01.12 (2011), RI-EBW-PRUEF (2017); DIN 1076 (1999); Betonkalender (2010) S247-290; ASTRA (2005), NBIS (2009); BRAML, T. (2010) u.a.

Abbildung 6: Arten der Zustandserfassung sowie Intervalle von Überwachung, Kontrolle und Prüfung der (Brücken-)Bauwerke

ÖNORM B 4706 (2015): Diese Norm behandelt im Wesentlichen die Wartung und Instandhaltung von Betonbauwerken. Sie beschreibt die Feststellung des Bauwerkszustandes mit Hilfe unterschiedlicher Methoden zur Untersuchung von Beton (z.B. Prüfung durch Augenschein, Prüfung durch Abklopfen, Rissaufnahme usw.). Um feststellen zu können ob Maßnahmen erforderlich sind, werden zudem Grenzwerte für Schadensmerkmale wie Karbonatisierung und Rissbildung angegeben. Weitere wesentliche Themen sind die Planung und Ausführung von Instandhaltungsmaßnahmen (Austrian Standards Institute, 2015).

RVS Reihe 13.03.XX (2010-2016): Diese RVS – Reihe behandelt die Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten wie Brücken, geankerte und ungeankerte Stützbauwerke, Straßentunnels, Wegweiserbrücken, Lärmschutzbauwerke und Wannens. Ausgehend von einheitlichen Erfassungsintervallen wird die spezifische Schadensansprache der Bauwerke sowie die Bewertung nach dem Schulnotensystem beschrieben.

RVS 13.03.01 (2012): Die RVS behandelt das Monitoring von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken mit dem Ziel einer Optimierung der Instandhaltungsplanung von Bauwerken durch kontinuierliche Erfassung des Trageverhaltens bzw. von Schäden (z.B. Rissweite) statt periodischer Untersuchungen. Dazu behandelt die RVS die entsprechenden Ziele, Verfahren und Abläufe des Monitorings samt Planung, Durchführung und Auswertung der Messungen. Zudem sind einige Beispiele für mögliche Anwendungsfälle mit den zugehörigen Zielen, Messgrößen, Sensorarten, sowie den Messmethode und ihren Anwendungsgrenzen näher erläutert. Zu finden sind hier Anwendungsbeispiele für Rissbreiten, Verformungsverhalten, Schwingungsmessungen, Ermüdung (Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, 2012).

RVS 13.03.11 (2011): Diese RVS ist die eigentliche Basis für die Zustandserfassung und Bewertung von Straßenbrücken in Österreich mit Vorgaben zur laufenden Überwachung (alle vier Monate), Kontrollen (alle 2 Jahre) und Prüfungen (alle 6 Jahre). Dabei sind die Brücken gemäß Tabelle 19 hinsichtlich Tragfähigkeit und Verkehrssicherheit zu prüfen und entsprechend den Vorgaben in Tabelle 20 im Schulnotensystem nach Bauteilen/Elementen und insgesamt zu bewerten. Je nach Ergebnis der Kontrollen und Prüfungen können zudem Sonderprüfungen erforderlich werden, die in Tabelle 21 dargestellt sind. Für eine spezifische Schadensansprache unterscheidet die RVS nach den Bauteilen Unterbau, Überbau, Deckschicht, Lager, Belag, Abdichtung und Entwässerung, Randbalken und sonstige Ausrüstung. Weiters werden die Erfordernisse an die Ergebnisdokumentation der Prüfung beschrieben wie

- den Zustand des Objekts mit Zustandsnoten für Objekt und Bauteile
- die Beurteilung der Benutzbarkeit des Verkehrsweges
- festgestellte Mängel bzw. Schäden
- erforderliche und empfohlene Maßnahmen
- Veranlassung einer Prüfung, wenn festgestellte Mängel oder Schäden nicht ausreichend genau ermittelt werden konnten
- Hinweise für die nächste Kontrolle und Zeitpunkt Prüfung
- Durchzuführende Sonderprüfungen und statische Nachrechnungen

RVS Reihe 13.04.XX (2009): In dieser RVS - Reihe werden Aufbau, Inhalt und erforderliche Funktionen einer Bauwerksdatenbank zusammen mit den erforderlichen Objektinformationen der Bauwerke (Brücken, Wannens, Mauern, Galerien und Tunnels, Wegweiserbrücken, LSW, Schutzbauten) definiert. Für Brücken erfolgt die Beschreibung z.B. anhand des Materials des Überbaus, der Geometrie und Stützweiten, der Art und Konstruktion des Querschnittes, der Vorspannung, der Brückenklasse, der Dimensionierung und Lastbeschränkung sowie der Zustandsbewertung Gesamt bzw. nach Bauteilen mit Prüfer und Erfassungszeitpunkt.

Tabelle 19: Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Brücken in Österreich (lt. RVS 13.03.11)

	Laufende Überwachung	Kontrolle	Prüfung
Zeitlicher Abstand	Alle 4 Monate	Alle 2 Jahre	Alle 6 Jahre
Allgemeines	Feststellung Funktionstüchtigkeit und Verkehrssicherheit, Feststellung von Schäden bei sachgemäßer Besichtigung erkennbar	Augenscheinliches feststellen, festhalten und Bewerten der Veränderung des Erhaltungszustandes zur Prüfung	Erhebung, Dokumentation und Bewertung des Erhaltungszustandes
Durchführung	Außergewöhnliche Veränderungen am Bauwerk, Sichtbare Beschädigungen der Fahrbahn, Entwässerung	Kontrolle an Unterbau, Überbau und Brückenausrüstung bzw. den o.a. Brückenelementen	Lage- und Höhenkontrolle Prüfung Unterbau und Überbau Prüfung Brückenausrüstung
Durchführendes Personal	Streckendienst	Sachkundiger Ingenieur oder erfahrenes Personal (z.B. Brückenmeister)	Sachkundiger Ingenieur mit Erfahrung in Brückenprüfung/Brückenbau
Ergebnis	Mängel, Schäden oder Veränderungen sind schriftlich zu melden. Sonstige schriftliche Aufzeichnungen sind nicht erforderlich	Festhalten neuer Mängel, Veranlassung von Prüfung bzw. Sofortmaßnahmen bei gravierenden Mängeln oder Schäden	Funktionsfähigkeit und Belastbarkeit des Objekts, Empfehlung erforderlicher Maßnahmen, Anweisung für nächste Kontrolle

Tabelle 20: Klassifizierung der Zustände von Brücken in Österreich (lt. RVS 13.03.11)

Klassifizierung	Einschränkungen	Schäden	Sanierungsmaßnahmen	Note
Schlechter Zustand	Tragfähigkeit und/oder Funktionsfähigkeit	Sehr schwere Schäden	Instandsetzungs-/Erneuerungsarbeiten unverzüglich einleiten	5
Mangelhafter Zustand	Funktionstauglichkeit vermindert Tragfähigkeit noch nicht eingeschränkt	Schwere Schäden	Instandsetzung kurzfristig (innerhalb von 3 Jahren) einleiten	4
Ausreichender Zustand	Anzeichen einer Verminderung der Funktionstauglichkeit	Mittelschwere Schäden	Instandsetzung mittelfristig (innerhalb von 6 Jahren) einleiten	3
Guter Zustand	Keine Einschränkungen	Geringe, leichte Schäden, Baumängel	Behebung im Zuge von Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten	2
Sehr guter Zustand	Keine Einschränkungen	Keine, sehr geringe Schäden, Baumängel	Keine	1
Keine Beurteilung	k.A.	k.A.	k.A.	0

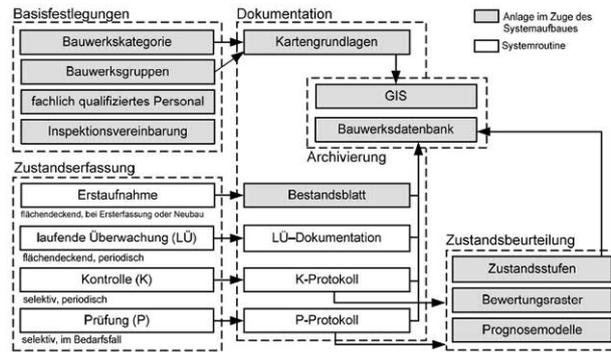
Tabelle 21: Sonderprüfungen von Brücken in Österreich (lt. RVS 13.03.11)

Art der Prüfung	Zielsetzung	Durchführung	Ergebnis
Stromgrundaufnahmen	Prüfung der Neigung zur Auskolkung, bestehender Auskolkung und vorhandener Schutzmaßnahmen	Sohlgrundaufnahmen über die gesamte Flussbreite mit GPS und Flächenlot in geeignetem Aufnahmeraster	<ul style="list-style-type: none"> Veränderung der Flusssohle Handlungsempfehlung
Dynamische Untersuchungen	Bestimmung des Schwingungs- und Resonanzverhaltens aufgrund von Wind und Verkehr etc.	Dynamische Messung des tatsächlichen Schwingungsverhaltens und Eigenfrequenzen, Intensität etc.	<ul style="list-style-type: none"> Eigenfrequenz, Intensität Gegenüberstellung Normen Maßnahmen (z.B. Dämpfer)
Kernbohrungen (Beton)	Feststellung der örtlichen Betoneigenschaften (Luftporengehalt, Betondruckfestigkeit)	Entnahme mit Kernbohrer mit fachgerechter Verfüllung und Prüfung (Uniaxial, Triaxial, Material etc.)	<ul style="list-style-type: none"> Druck-/Zugfestigkeit Luftporengehalt Sonstige Materialparameter
Bewehrungslage & Überdeckung	Feststellung der Bewehrungslage sowie der vorhandenen Überdeckung	Durchführung mit Bewehrungssuchgerät sowie stichprobenartiger Freilegung der Bewehrung	<ul style="list-style-type: none"> Betonüberdeckung [cm] Durchmesser & Lage Bewehrung
Rissbreitenbeobachtung	Gezielte Beobachtung möglicher schädlicher Risse unter Berücksichtigung von Temperatur und Verkehr	Messung mit Setzdehnungsmessgerät oder geeignetem Monitoringverfahren mit periodischer Auswertung	<ul style="list-style-type: none"> Rissbreitenveränderung [µm] Kritische Veränderung in Echtzeit (z.B. Sondertransport)
Chemisch-Technische Untersuchungen	Feststellung ob und in welchem Umfang ein chemischer Angriff auf Beton und Stahl besteht	Prüfung der Karbonatisierungstiefe mit Phenolphthalein bzw. Chloridkonzentration über Bohrmehl nach Tiefe	<ul style="list-style-type: none"> Karbonatisierungstiefe [cm] Chloridkonzentration [%]
Potentialfeldmessungen	Auffindung und Abgrenzung von aktiven Korrosionsstellen	Messung auftretender Potentialfelder entlang von Stahleinlagen mit Messselektroden sowie Stichproben	<ul style="list-style-type: none"> Korrosionsfortschritt Restquerschnitt Stahleinlagen
Prüfung der Spannglieder und Spannköpfe	Feststellung des Verpresszustandes sowie Korrosionserscheinungen an Spanngliedern und Spannköpfen	Überprüfung augenscheinlich sowie mit Endoskop bzw. sonstigen Prüfmethoden	<ul style="list-style-type: none"> Zustandsfeststellung Handlungsempfehlung
Prüfung Stahlbauteile und Schweißnähte	Sicherstellung der strukturellen Festigkeit und Schadensfreiheit	Prüfung der Fehlstellen mit dem Farbänderungsverfahren oder Magnetpulververfahren	<ul style="list-style-type: none"> Fehlstellen Grundmaterial und Schweißnähte Handlungsempfehlungen
Prüfung Kabel und Seile	Feststellung möglicher Drahtbrüche und Spannkraft von Kabeln und Seilen	Kontrolle der Spannkraft über Messung der Eigenfrequenz, Drahtbrüche über magnetinduktive Seilprüfung	<ul style="list-style-type: none"> Spannkraft Drahtbrüche Handlungsempfehlung

2.2.2 Naturgefahren

Das Risiko durch Naturgefahren sowie das Ausmaß der Schäden nehmen im Alpenraum kontinuierlich zu. Aufgrund des begrenzten Raumangebotes insbesondere in Tallagen werden gefährdete Gebiete immer intensiver genutzt. Landwirtschaftliche und touristische Nutzung, Bodenerosion und Bodenversiegelung sowie andere anthropogene Einflüsse reduzieren die Retentionsräume. Zudem führen die Auswirkungen des Klimawandels in vielen Gebieten zu einer erhöhten Intensität von Wetterereignissen und der daraus resultierenden Naturgefahren. Typische Naturgefahren in diesem Kontext sind Hochwasser, Muren, Rutschungen, Fels- und Bergstürze, Stein-/Blockschläge, Lawinen, Stürme, Hagel und Waldbrände. Neben raumplanerischen Maßnahmen und Schutzplänen kommen daher aktiven und passiven Schutzmaßnahmen eine besondere Bedeutung zu. Im Rahmen des Forschungsprojektes RISKMON geht es um die Zustandserfassung, Maßnahmenvorbereitung und Einsatz von UAV in Gefahrenbereichen bzw. vor/während/nach Naturgefahren an der Verkehrsinfrastruktur. Demgemäß sind der Stand von Technik und Wissenschaft mit den wesentlichen Richtlinien und Normen der Zustandserfassung der Anlagen sowie Vorgehensweisen der Betreiber zu berücksichtigen.

Übersicht Instrumente der Zustandserfassung



Zustandsbeurteilung aus gutachterlicher Sicht

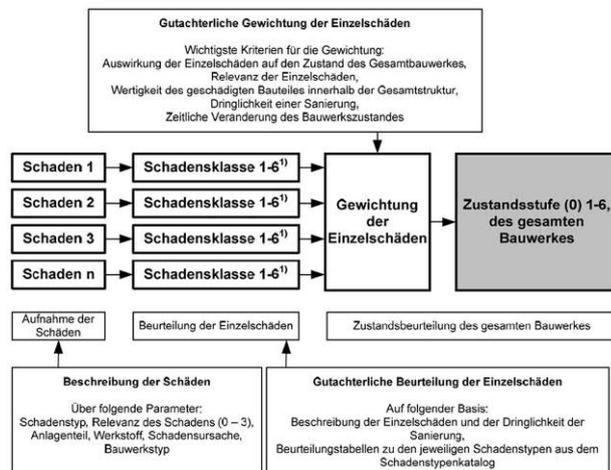


Abbildung 7: Instrumente der baulichen Zustandserfassung und Methodik der Zustandsbeurteilung von Schutzbauwerken (aus SUDA, J. 2013)

Als Schutzbauwerke werden Ingenieurbauwerke bezeichnet, deren Aufgabe darin besteht den menschlichen Siedlungsraum vor Naturgefahren zu schützen. Man unterscheidet in Schutzbauwerke vor Wildbachdynamik (Hochwasser, Murstöße) und Schutzbauwerke vor Lawinen und Steinschlägen. Weiters kann man diese Strukturen entsprechend ihrer Form in flächenhafte Bauwerke (Drainagen, Entwässerungen, Lawinenverbauung) und linienhafte Elemente (Uferwände, Stützmauern, Sperrenbauwerke, Schutzdamm, Einhausungen) unterteilen. Bei der Beurteilung der Sicherheit eines Elementes oder Einzelbauwerkes von Schutzmaßnahmen ist immer das Gesamtsystem der Schutzanlagen in Wechselwirkung mit den Naturgefahren und den zu schützenden Gütern zu betrachten. Der Begriff Versagen umfasst dabei neben dem Versagen der unmittelbaren Tragfähigkeit auch das Versagen der Gebrauchstauglichkeit bzw. der intendierten Schutzfunktionalität Einzelbauwerkes oder des Gesamtsystems. Ein Versagen der Gebrauchstauglichkeit liegt vor, wenn das Einzelbauwerk oder das Gesamtsystem nicht in der Lage war Geschiebe, Hochwasser, Muren, Lawinen gemäß den Dimensionierungsanforderungen ausreichend zurückzuhalten und entsprechende Schäden an den Schutzgütern abzuwehren.

Auch Schutzbauwerke werden regelmäßigen Kontrollen/Prüfungen/Überwachungen unterzogen, um die Funktionsfähigkeit und Schutzwirkung über die geplante Lebensdauer gewährleisten zu können. In Österreich wird die Normenreihe ONR 24800 angewandt, um die Anforderungen

rungen an die Instandhaltung und Überwachung von Schutzbauwerken gegen Wildbäche, Stein- schlag und Lawinen zu erfüllen. Die Beurteilung des Zustandes eines Schutzbauwerkes erfolgt durch geschulte erfahrene Prüfer anhand periodischer visueller Zustandserfassung und Bewertung nach dem Schulnotensystem. Die Instrumente der Inspektion sind die Dokumentation mit Karten- grundlagen und Bauwerksdatenbank, die Zustandserfassung mit Erstaufnahme (Bestandsblatt) und die Zustandsbewertung. Die laufende Überwachung dient zur Feststellung der Gebrauchstauglich- keit der Schutzbauwerke bzw. der durch sie geschützten Bereiche (z.B. Straße, Bahn) mit Feststel- lung der Schäden durch geschultes Personal. Die Kontrolle dient der Erhebung des Bauwerkszu- standes mittels entsprechender Formulare durch fachkundige Experten (K-Protokoll). Die Prüfung dient der umfassenden Erhebung des Erhaltungszustandes und Zustandsbewertung mit Systembe- trachtung (P-Protokoll) durch sachkundige Experten (Abbildung 7, Tabelle 22).²²

ONR 24803: Diese Norm regelt den Betrieb, die Überwachung und Instandhaltung von Schutzbauwerken der Wildbachverbauung. Die Überwachung für Schlüsselbauwerke erfolgt jähr- lich und ist für Standardbauwerke nur alle 5 Jahre erforderlich. Die Kontrolle erfolgt alle 5 Jahre für Schlüsselbauwerke, ansonsten sind keine Intervalle festgelegt. Die Prüfung erfolgt grundsätz- lich alle 10 Jahre bzw. nach Erfordernis aufgrund festgestellter Schäden.

ONR 24807: Diese Norm beinhaltet die Anforderungen und Vorgehensweisen in der Über- wachung und Instandhaltung von Anlagen für den permanenten Lawinenschutz. Die Überwachung für Schlüsselbauwerke erfolgt jährlich, für die übrigen Anlagen ist kein Intervall festgelegt. Die Kontrolle erfolgt alle 5 Jahre für Schlüsselbauwerke, ansonsten sind keine Intervalle festgelegt. Die Prüfung erfolgt grundsätzlich alle 10 Jahre bzw. nach Erfordernis aufgrund von Schäden.

ONR 24810: Die Norm enthält die Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung für Anlagen des technischen Steinschlagschutzes zusammen mit den Vorgehens- weisen in Überwachung und Instandhaltung. Die Überwachung erfolgt grundsätzlich für Schlüs- selbauwerke und alle anderen Anlagen jährlich, wobei für Bauwerke an Verkehrswegen die ein- schlägigen Regelungen der RVS (alle 4 Monate bzw. jährlich gelten). Die Kontrollen erfolgen alle 5 Jahre für Schlüsselbauwerke bzw. alle 10 Jahre für Standardbauwerke bzw. an Straßen alle 2 Jahre (Schutzbauwerke) bzw. 3 Jahre (geankerte Konstruktionen/Stützbauwerke). Die Prüfung er- folgt grundsätzlich alle 6 Jahre bzw. alle 10 Jahre gemäß RVS sowie nach Erfordernis aufgrund festgestellter Schäden.

Tabelle 22: Klassifizierung der baulichen Zustandsstufen für Standard- und Schlüsselbauwerke

Klassifizierung	Einschränkungen	Schäden	Sanierungsmaßnahmen	Note
Zerstörung	Totalausfall bereits eingetreten		Unverzügliche Absicherung und Bau von Ersatz	6
Schlechter Zustand	Tragfähigkeit und/oder Funktionsfä- higkeit nicht gegeben	Sehr schwere Schäden	Instandsetzungs-/Erneuerungsarbeiten unverzüglich einleiten	5
Mangelhafter Zustand	Funktionstauglichkeit vermindert Tragfähigkeit noch nicht eingeschränkt	Schwere Schäden	Instandsetzung kurzfristig (innerhalb von 3 Jahren) einleiten	4
Ausreichender Zustand	Anzeichen einer Verminderung der Funktionstauglichkeit	Mittelschwere Schäden	Instandsetzung mittelfristig (innerhalb von 6 Jahren) einleiten	3
Guter Zustand	Keine Einschränkungen	Geringe, leichte Schä- den, Baumängel	Behebung im Zuge von Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten	2
Sehr guter Zustand	Keine Einschränkungen	Keine, sehr geringe Schäden, Baumängel	Keine Maßnahmen erforderlich	1
Keine Beurteilung/obsolet	k.A.	k.A.	Abbruch	0

²² vgl. SUDA, J. (2013; 2015)

Unabhängig von dem baulichen Zustand von Anlagen zum Schutz von Naturgefahren erfolgt auch eine Einschätzung der generellen Gefährdungslage für Hochwasser sowie gegen Vermurung und Lawinen (z.B. BWBV (30/100/300) Gelb, GelbRot, Rot sowie WLW (10/30/100) Gelb, Rot, Braun) und Ereignisdokumentation. Für konkrete Gefahrenlagen durch Naturgefahren im Anlassfall erfolgen Warnungen durch die zuständigen Stellen für Hochwasser (z.B. hydrographischen Dienste) mit Warnmeldungen gemäß den definierten Warnstufen (Tabelle 23). Bei Lawinengefahr erfolgt eine Bewertung der Gefahrenlage gemäß der Einschätzung der Schneelage (Abbildung 8) durch eine Lawinenkommission auf Basis der fünfstufigen Europäischen Lawinengefahrenskala für das jeweilige Gebiet (Tabelle 24). Für konkrete Beurteilungen werden darüber hinaus die Daten von Messstationen vor Ort (Abbildung 9) sowie falls möglich Schneehöhen und Schneeprofilmessungen für die Beurteilung herangezogen.

Tabelle 23: Klassifizierung von Hochwassermeldungen und Warnstufen (DACH-Länder)

HQ	Deutschland	Österreich	Schweiz
>MQ	Keine oder geringe Gefahr	Erhöhtes Mittelwasser – sehr häufig	1. Keine oder geringe Gefahr
>HQ1		1a) Kleines Hochwasser - häufig	
>HQ2	Kleines Hochwasser Warnstufe 1 (Meldebeginn)	1b) Mittleres Hochwasser – selten bis häufig	2. Mäßige Gefahr
>HQ5			
>HQ10	Mittleres Hochwasser Warnstufe 2 (Kontrolldienst)	2) Großes Hochwasser - selten	3. Erhebliche Gefahr
>HW20	Großes Hochwasser Warnstufe 3 (Wachdienst)	3a) Sehr großes Hochwasser – sehr selten	
>HQ30			4. Große Gefahr
>HQ50	Sehr großes Hochwasser Warnstufe 4 (Hochwasserabwehr)	3b) Extremes Hochwasser – extrem selten	
>HQ100			5. Sehr große Gefahr
RHHQ			

Tabelle 24: Klassifizierung der Lawinengefahr - Europäischen Lawinengefahrenskala (EAWS)

Warnstufe	Bedeutung
1 – gering	Die Schneedecke ist allgemein gut verfestigt und stabil. Auslösung ist allgemein nur bei großer Zusatzbelastung ² an sehr wenigen, extremen Steilhängen möglich. Spontan sind nur kleine Lawinen (sogenannte Rutsche) möglich. Keine Gefährdung. Allgemein sichere Verhältnisse.
2 – mäßig	Die Schneedecke ist an einigen Steilhängen ¹ nur mäßig verfestigt, ansonsten allgemein gut verfestigt. Auslösung ist insbesondere bei großer Zusatzbelastung ² , vor allem an den angegebenen Steilhängen möglich. Größere spontane Lawinen sind nicht zu erwarten. Kaum Gefährdung durch spontane Lawinen. Mehrheitlich günstige Verhältnisse. Vorsichtige Routenwahl, vor allem an Steilhängen der angegebenen Exposition und Höhenlage.
3 – erheblich	Die Schneedecke ist an vielen Steilhängen ¹ nur mäßig bis schwach verfestigt. Auslösung ist bereits bei geringer Zusatzbelastung ² vor allem an den angegebenen Steilhängen möglich. Fallweise sind spontan einige mittlere, vereinzelt aber auch große Lawinen möglich. Exponierte Teile vereinzelt gefährdet. Dort sind teilweise Sicherheitsmaßnahmen zu empfehlen. Teilweise ungünstige Verhältnisse. Erfahrung in der Lawinenbeurteilung erforderlich. Steilhänge der angegebenen Exposition und Höhenlage möglichst meiden.
4 – groß	Die Schneedecke ist an den meisten Steilhängen ¹ schwach verfestigt. Auslösung ist bereits bei geringer Zusatzbelastung ² an zahlreichen Steilhängen wahrscheinlich. Fallweise sind spontan viele mittlere, mehrfach auch große Lawinen zu erwarten. Exponierte Teile mehrheitlich gefährdet. Dort sind Sicherheitsmaßnahmen zu empfehlen. Ungünstige Verhältnisse. Viel Erfahrung in der Lawinenbeurteilung erforderlich. Beschränkung auf mäßig steiles Gelände / Lawinenauslaufbereiche beachten.
5 – sehr groß	Die Schneedecke ist allgemein schwach verfestigt und weitgehend instabil. Spontan sind zahlreiche große Lawinen, auch in mäßig steilem Gelände zu erwarten. Akute Gefährdung. Umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen. Sehr ungünstige Verhältnisse. Verzicht empfohlen.



Neuschnee (Situationsbeurteilung):

10-20 cm bei ungünstigen Bedingungen
20-30 cm bei mittleren Bedingungen
30-50 cm bei günstigen Bedingungen
ungünstig: Oberflächenreif, günstig: stab. Altschnee

Schneefall der letzten drei Tage führt zu unmittelbarer Erhöhung der Lawinengefahr, die in Folgetagen durch Setzung und Konsolidierung abnimmt. Schneemenge der Lawine nach Lage Schwachschicht...



Tribschnee (Situationsbeurteilung):

Erforderlich: Lockerer (Neu-)Schnee, Wind
Erkennbar an Dünen, Wellen
Warnzeichen: vorhandene Schneebretter
ungünstig: Oberflächenreif, günstig: stab. Altschnee

Tribschnee entsteht durch (Wind-)Verfrachtung von Neuschnee oder lockerem Altschnee. Als kritisch wird beurteilt, wenn Verfrachtungen in den letzten 3 Tagen entstanden sind (nicht konsolidiert)



Altschnee (Situationsbeurteilung):

Schneedeckenaufbau gemäß Lagebericht/Profil
Lokale Gefahrenstellen sind selten
Maßgebend sind Dicke, Dichte und Lage der Schwachstellen sowie Hangneigung

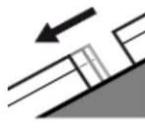
Altschnee besteht dann, wenn die Schneedecke nicht durch Niederschlag, Wind oder Schmelzprozesse verändert wurde. Die Situation ist beständig



Nassschnee (Situationsbeurteilung):

Erforderlich: Regen, Plusgrade oder Tauwetter
Typ 1: Regen, warme Temperaturen
Typ 2: Starkes Tauwetter
ungünstig: Warm, Regen, günstig: Klar, gefrieren

Nassschnee entsteht durch Eindringen von Wasser infolge Regen bei warmen Temperaturen oder Tauvorgang tagsüber im Frühjahr. Die Situation stabilisiert sich bei tiefen Temperaturen (Gefrieren)



Gleitschnee (Situationsbeurteilung):

Erforderlich: Glatte Untergrund, feucht
Typ 1: Warmer, feuchter glatter Boden (Neuschnee)
Typ 2: Starkes Tauwetter, glatter Boden (Altschnee)
ungünstig: Warm, Regen, günstig: Klar, gefrieren

Bei Gleitschnee rutscht die gesamte Schneedecke auf einem glatten Untergrund (Gras, Fels) ab. Die Schneedecke ist bis auf die bodennahe Grenzschicht trocken – meist im Frühjahr (Tauen, Regen)

- Zur Beurteilung der (momentanen) Lawinensituation wird in Neuschnee, Tribschnee, Altschnee & Nassschnee unterschieden
- Die Beurteilungsansätze zielen auf das Betreten (z.B. Ski) ab und spiegeln sich in den Lawinewarnstufen wider
- Für Verkehrsträger kommt es auf die tatsächliche Größe und Wirkung der Lawine an → kritische Schneehöhe viel größer

Abbildung 8: Übersicht Situationsbeurteilung der Schneelage für Neuschnee, Tribschnee, Altschnee, Nassschnee und Gleitschnee in Bezug auf die Lawinengefahr

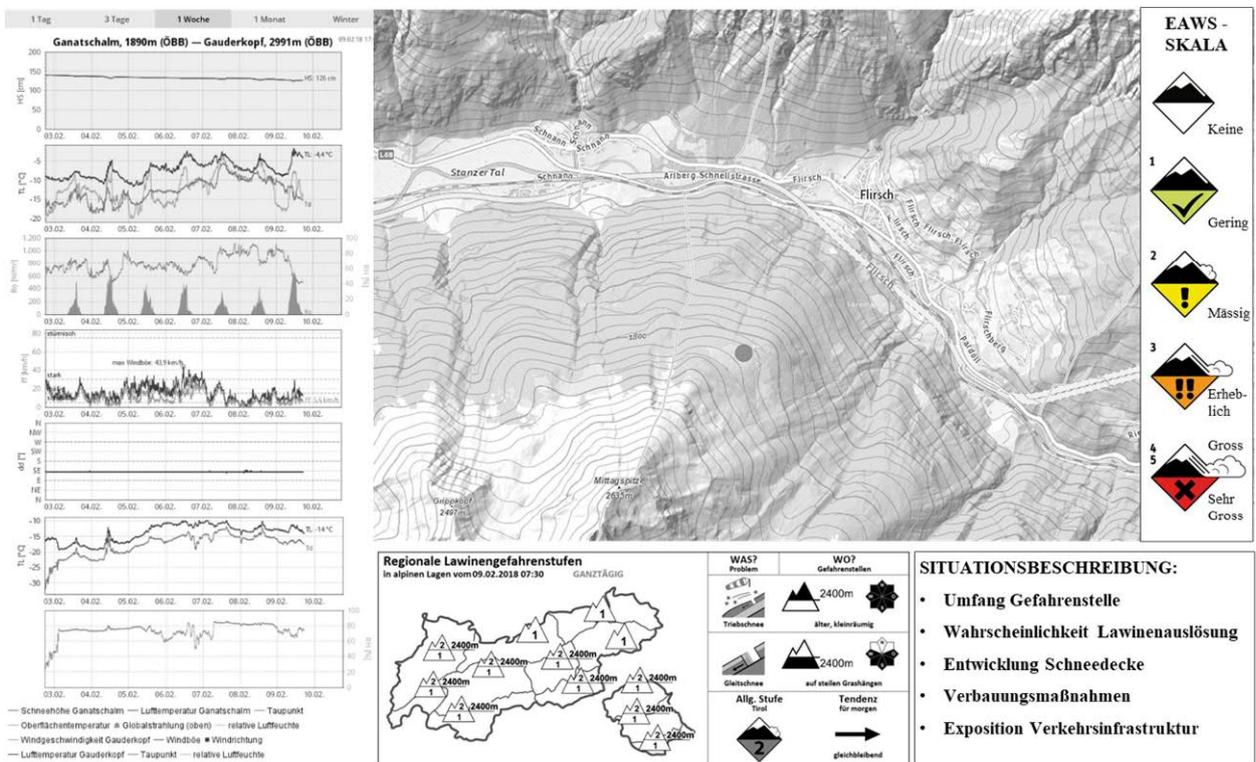


Abbildung 9: Übersicht Monitoring und Erfassung Naturgefahren am Beispiel eines Lawinenhangs mit EAWS – Gefährdungsskala und Aufzeichnungen einer typischen Messstation

Die allgemeine Lagebeurteilung der Schneesituation greift jedoch vielfach in Hinblick auf die konkrete Situation für einzelne Verkehrsträger zu kurz. Daher wird die konkrete Lawinengefahr an definierten Streckenabschnitten von ÖBB und ASFINAG gesondert beurteilt und auf dieser Basis entsprechende Maßnahmen vorgeschlagen. So kennt die ÖBB gemäß dem Regelwerk 06.02.01 Instandhaltung – Maßnahmen bei Frost und Schnee die folgenden drei Lawinenalarmstufen zusammen mit den entsprechenden Vorgehensweisen und Maßnahmen:

Lawinenalarmstufe 1 (LAS1):

- Es werden keine betrieblichen Einschränkungen und Schäden erwartet
- Wenn in der Geschäftsordnung nicht anders vorgesehen ist die LAS 1 spätestens ab amtlicher Lawinenwarnstufe 4 für das entsprechende Gebiet auszurufen
- Nachweisliche tägliche Beobachtung und deren Dokumentation mittels Aufnahmeformular durch die jeweilige ÖBB-LK
- Die Beurteilung der Gefährdung nach Bedarf sowie die Dokumentation aller Aktivitäten und die Entschlüsse der ÖBB-LK sind mittels Protokolls durchzuführen
- Tägliche Eingabe der Prognose über das ÖBB-Lawinenbulletin

Lawinenalarmstufe 2 (LAS2):

- Es sind betriebliche Einschränkungen möglich. Schäden werden aufgrund des Inkrafttretens betrieblicher und/oder technischer Maßnahmen nicht erwartet
- Die LAS 2 wird vom Obmann der jeweiligen ÖBB-LK ausgerufen
- Der regionale ÖBB-LWD ist zu informieren
- Nachweisliche tägliche Beobachtung und deren Dokumentation mittels Aufnahmeformular durch die jeweilige ÖBB-LK
- Die Beurteilung der Gefährdung nach Bedarf sowie die Dokumentation aller
- Aktivitäten und die Entschlüsse der ÖBB-LK sind mittels Protokolls durchzuführen
- Tägliche Eingabe der Prognose über das ÖBB-Lawinenbulletin
- Empfehlung von betrieblichen und/oder technischen Maßnahmen ist abzugeben
Mögliche Maßnahmen: Langsamfahrten, Tfz im Vorspann, Gleissperre, Schleusenverkehrs einstellen, Lotsenfahrten, Erkundungsflüge, künstliches Auslösen

Lawinenalarmstufe 3 (LAS3):

- Es werden betriebliche Einschränkungen (Streckensperren, ...) erwartet. Schäden aufgrund von Lawinen sind wahrscheinlich
- Das Betreten und Befahren der lawinengefährdeten Abschnitte nur in Absprache mit ÖBB-LK
- Die LAS 3 wird vom Obmann der jeweiligen ÖBB-LK ausgerufen, der zentrale und regionale LWD sind zu informieren
- Nachweisliche tägliche Beobachtung und deren Dokumentation mittels Aufnahmeformular durch die ÖBB-LK
- Die Beurteilung der Gefährdung nach Bedarf sowie die Dokumentation aller Aktivitäten und die Entschlüsse der ÖBB-LK sind mittels Protokolls durchzuführen
- Tägliche Eingabe der Prognose über das ÖBB-Lawinenbulletin
Empfehlung von betrieblichen und/oder technischen Maßnahmen ist abzugeben, mögliche weitere Maßnahmen: Streckensperre, Evakuierung, Erkundungsflüge, künstliches Auslösen

2.2.3 Streckenerfassung

Die Bestandsstrecken der hochrangigen Eisenbahnlinien (5.500 km Kernnetz, 1.260 km Ergänzungsnetz) sowie der Autobahnen und Schnellstraßen (2.200 km, 11.500 Fahrstreifenkilometer) tragen die Hauptlast des Verkehrsaufkommens in Österreich. Im internationalen Vergleich weist die betriebliche Instandhaltung dieser Kernnetze ein hohes Qualitätsniveau auf, dass durch tägliche Kontrollen und regelmäßige Streckeninspektionen im Zuge der betrieblichen Instandhaltung sichergestellt wird. Die Häufigkeit der Streckeninspektionen ist grundsätzlich in den jeweiligen Normen und Dienstvorschriften bzw. Erhaltungsplänen festgelegt. Die konkrete Durchführung erfolgt sowohl sachunspezifisch im Rahmen der allgemeinen Kontrollfahrten und spezifisch periodisch zur Kontrolle von Anlagentypen (z.B. Brücken, Entwässerung) oder Aufgabenbereichen (z.B. Winterdienst, Verkehrszeichen, Weichen). Weiters finden ungeplante Kontroll- und Aufklärungsfahrten zur Behebung gemeldeter Störungen (z.B. Gleiszutritt, Ladungsverlust) oder ungeplanter Ereignisse (z.B. Störmeldung Signalanlage) statt. Alle im Zuge dieser Kontrollen und Inspektionen erfassten Vorkommnisse werden an Bahn und Straße über standardisierte Streckenprotokolle und Checklisten protokolliert. Diese Streckenprotokolle bilden die Basis für die Einleitung erforderlicher Maßnahmen und stellen ein wichtiges Beweisdokument für allfällige Schadensereignisse dar.

RVS 12.01.12 (2013): Die erforderlichen Standards der betrieblichen Erhaltung der (Landes-)Straßen sind in dieser Norm festgelegt und sollen neben einer Vereinheitlichung eine effektive und effiziente Leistungserbringung ermöglichen. Die RVS unterscheidet Leistungen zur Anforderungsgemäßen Sicherung und Nutzung (z.B. Winterdienst, Gehölzschnitt), Leistungen zur Bewahrung und Wiederherstellung des anforderungsgerechten Zustands (z.B. Instandhaltung, Schilder) und Leistung zur Gewährleistung des Zustandes (z.B. Reinigen, Warten). Gegenstand der Leistungsbeschreibung sind qualitative und quantitative Anforderungen an das Ergebnis der Leistungserbringung der Fahrbahninstandhaltung, an Brücken und Mauern, Tunnels, Straßenausrüstung, Winterdienst, Grünflächenpflege, Nebenanlagen und im Streckendienst. Die Umsetzung erfolgt durch das Betriebspersonal der (Autobahn-)Meistereien gemäß konkreten Erfordernissen aus der Streckenerfassung sowie den festgelegten betrieblichen Instandhaltungsplänen.

Regelwerk 06.01.01 (2013), ÖBB 40 (2017): Zur Gewährleistung eines hohen betrieblichen Standards und der Sicherheit ihrer Mitarbeiter bestehen eine Reihe von einschlägigen Normen und Regelwerken für die Bahninfrastruktur. Regelmäßige Inspektionen stellen die Basis der Leistungserbringung im Bereich des Oberbaus, Geleisen, Weichen und Stellwerken, Mauern, Tunnels, Stellwerken, Sicherheitseinrichtungen und Stromversorgung, Winterdienst und Grünflächenpflege, Nebenanlagen und bei Störfällen dar. Die Umsetzung der Kontrollen, der sich daraus ergebenden unplanmäßigen Leistungen sowie der Umsetzung der planmäßigen Leistungen in diesen Aufgabenbereichen erfolgt durch das Betriebspersonal der Bahn. Aufgrund der Gefährlichkeit der Tätigkeit bestehen eine Reihe umfassender Sicherheitsvorschriften für die Durchführung der Streckenerfassung und Umsetzung der erforderlichen Arbeiten. Die Ergebnisse der planmäßigen Streckeninspektionen und ungeplanten Kontrollfahrten sind standardisiert und sind Basis für den regelmäßig zu erbringenden Leistungsnachweis.

Zusammenfassend sind planmäßige Streckenerfassungen und anlassbezogene Kontrollfahrten wesentliche Voraussetzung für einen sicheren Betrieb und die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit. Neben standardisierten, periodisch wiederkehrenden Leistungen geht es für den Streckendienst insbesondere darum plötzlich auftretende Veränderungen zeitnahe zu erkennen und sich daraus ergebende Störungen und Beeinträchtigungen zu minimieren. Aufgrund der Vielfalt der Anforderungen erfolgt die Erfassung meist anhand von Leerformularen durch entsprechend geschultes Personal nach Aufgabenbereichen und Checklisten.

2.2.4 Außergewöhnliche Ereignisse

Aus organisatorischer Sicht von Betreibern der Verkehrsinfrastruktur reicht die Bandbreite außergewöhnlicher Ereignisse von kleinen Störungen der betrieblichen Abläufe über Betriebsunterbrechungen infolge von Anlageausfällen bis zu Katastropheneignissen infolge von Großunfällen, Naturgefahren und Anschlägen. Die Gewährleistung eines effizienten Betriebes und das Management der Verkehrsflüsse zusammen mit der Koordination im Fall von kleineren Störungen und Betriebsunterbrechungen erfolgt üblicherweise in Verkehrsmanagementzentralen (VMZ). Die Krisenprävention und Intervention erfolgt dagegen auf Basis entsprechend vorbereiteter Einsatzpläne in Abstimmung mit den zuständigen Einsatzorganisationen. Die zu diesem Zweck eigens eingerichteten Krisenstäbe schaffen durch regelmäßige Schulungen und Vorbereitung sowie Kontrollen die Basis für einen möglichst reibungslosen und effizienten Einsatz. Eine systematische Ereignisdokumentation nach Art des Störfalles, Umfang und Ausmaß der Störungen, Störungsfolgen sowie umgesetzten Maßnahmen und Kosten der Behebung erlaubt ein evidenzbasiertes Management des Ressourceneinsatzes in der Prävention und Bewältigung von Störungen und Krisen.

ASFINAG: Die ASFINAG betreibt in Österreich neun Verkehrsmanagementzentralen (VMZ), welche die Überwachung und Analyse des Verkehrsgeschehens, die Verkehrssteuerung und das Ereignismanagement, die Überwachung des Betriebszustandes sowie Alarmierung der Einsatzkräfte sicherstellen. Die nationale VMZ dient dabei als Kommunikationsdrehscheibe, stellt die überregionale Zusammenarbeit sicher und sorgt für einen reibungslosen Ablauf gemäß dem festgelegten Prozessmanagement. Darüber hinaus wird die standardisierte Ereignisdokumentation entsprechend qualitätsgesichert und bildet damit die Basis für die künftige Einsatzplanung. Wesentlicher Bestandteil ist die Einführung eines neuen Verkehrsmanagement und Informationssystems (VMIS 2.0) sowie einer erweiterten Verkehrsinformationsplattform (VINFO 2.0). Zusammen mit dem bestehenden System der Videoüberwachung ist eine nahezu lückenlose Verkehrsüberwachung des Autobahn- und Schnellstraßennetzes in Echtzeit möglich. Der Streckendienst an 43 Autobahnmeistereien erlaubt kurze Wege und sorgt rund um die Uhr für einen reibungslosen Betrieb sowie eine schnelle Reaktion, Absicherung und Behebung im Fall von Störungen oder Ausfällen am gesamten Netz. Im Fall größerer Ereignisse erfolgt zudem eine umgehende Information der Kriseneinsatzstäbe und der Einsatzkräfte um eine schnelle Rettung, Sicherung und Behebung von Störungen zu gewährleisten.²³

ÖBB: Das Verkehrsmanagement der ÖBB gewährleistet die Überwachung des Betriebszustandes und der Verkehrsabläufe, die Verkehrssteuerung, Ereignismanagement und Dokumentation. Im Fall gemeldeter Störungen oder Betriebsunterbrechungen erfolgt eine schnelle Aufklärung durch das Betriebspersonal vor Ort als Basis für die Streckenfreigabe. Die Zugbeeinflussungsanlagen der ÖBB gemäß dem European Train Control System (ETCS) gewährleisten einen einheitlich hohen Sicherheitsstandard im Fall von Ereignissen. Das operative Störungsmanagement ist für die Behandlung operativer Störungen und Ausfällen der Infrastruktur zuständig. Darüber hinaus verfügt die ÖBB über ein eigenes Notfallmanagement, das gleichermaßen eine Abwehr von Gefahr im Verzug sowie die Behandlung von Unfällen mit Gefahr für Leib und Leben gewährleistet. Die dafür eingerichteten Krisenstäbe sind darauf trainiert auftretende Krisen in Abstimmung mit den Einsatzkräften zu bewältigen. Die Ereignisdokumentation erlaubt darüber hinaus eine systematische Auswertung und Vorbereitung auf künftige Vorfälle.²⁴

²³ vgl. HARRER, M. et al. (2016)

²⁴ vgl. SKACH, K. et al. (2011)

2.3 Zustandserfassung mit unbemannten Luftfahrzeugsystemen

Mit Flugbenzin (AvGAs) bzw. Flugturbinen- und Dieseltkraftstoff betriebene unbemannte Luftfahrzeuge weisen schon seit mehreren Jahrzehnten eine über mehrere Stunden en lange Einsatzdauer auf, waren aber in Kombination mit dem höheren Gewicht und damit verbundenen Risiken nur bedingt für Einsätze im Bereich Infrastruktur geeignet. In den letzten Jahren ist die Leistungsfähigkeit von elektrisch betriebenen unbemannten Luftfahrzeugen stark gestiegen. Dies hat nicht nur positive Auswirkungen auf die Flugdauer (endurance) sondern auch auf die Stabilität in der Luft und maximale Nutzlast. Parallel wurden auch verschiedenste Sensoren wie bspw. Thermalkameras, Laserscanner und Hyperspektralkameras leistungsfähiger bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion. Eigens von den führenden Sensorherstellern für den Airborne-Einsatz entwickelte Sensorvarianten erleichtern und optimieren deren Integration in ein UAS-Gesamtsystem und somit dessen Leistungsfähigkeit.

Somit wurden die technischen Voraussetzungen für einen vermehrten und zuverlässigen Einsatz im Bereich von Industrie und Infrastruktur geschaffen. Je nach Anwendungsbereich kommen verschiedene UAV-Typen in Frage: Dies sind zum einen unbemannte Flächenflugzeuge, VTOL (Vertical Take off and Landing) UAV, also Helikopter-UAV sowie sogenannte Hybrid-Versionen welche die Eigenschaften von Flächenflugzeugen (lange Endurance, benötigte Start- und Landebahn) mit jenen von Hubschraubern (Schwebeflug, vertikaler Aufstieg, Autorotation) vereinen.

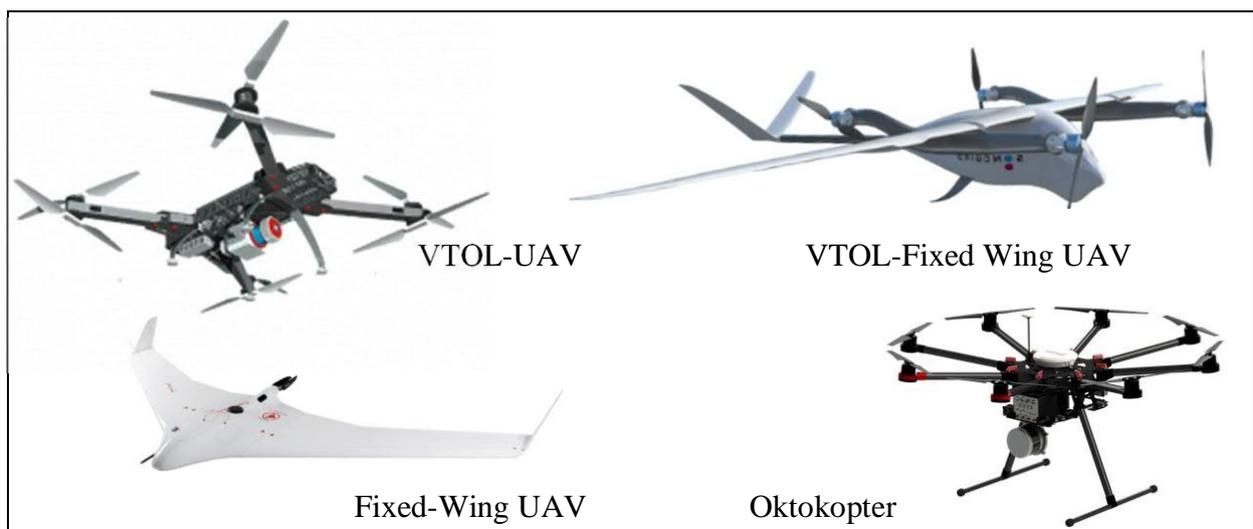


Abbildung 10: Ausgewählte UAV-Typen beispielhaft

Die wesentlichsten Anforderungen an professionelle UAS-Systeme sind sich sehr präzise in der Luft zu bewegen, stabil in der Luft zu halten (Schwebeflug), die vorgegebenen Positionen exakt erreichen und einhalten zu können, zuverlässig Daten aufzuzeichnen bzw. mit dem Boden effizient zu kommunizieren (Stichwort Konnektivität). Die notwendige Sicherheit wird, zumindest bei hochwertigen und auch hochpreisigen Geräten u.a. auch durch (doppelt) redundante Systeme an Board sowie am Boden gewährleistet.

Die Leistungsfähigkeit, Verarbeitungsqualität und Hochwertigkeit der verwendeten Komponenten beeinflussen auch das Preisniveau der am Markt verfügbaren Serienprodukte. Diese Preisspanne für das Basis-UAS im professionellen Einsatzbereich reicht vom unteren Niveau bei rund EUR 10.000 bis deutlich über EUR 150.000. (Flug)Benzin und Dieselbetriebene Geräte können dann das 7-stellige Preissegment durchstoßen. Fortschritte bei Sensorik und stromsparenden Technologien der Konnektivität machen UAV für industriellen Einsatz sehr attraktiv und effizient.

Tabelle 25: Übersicht ausgewählte UAV samt Spezifikationen

Bezeichnung	Spezifikationen	Sonstiges/Daten	Eignung
Schiebel Camcopter S-100: 	Abmessung: 311 × 124 × 112 cm (Rotordurchmesser 3,4 m) Gewicht/Tragkraft: 110 kg / max. 200 kg Geschwindigkeit: 220 km/h (ohne Wind) Reichweite: 5,5 km Höhe, 180 km Dist. Flugzeit: Keine Zuladung 360 min, 25 kg Zuladung: > 360min Einsatz: -40°C bis +55°C Windwiderstand: 50-80 km/h	Preis: ab rd. 1,5 – 2,0 Mio. € (nach Anzahl und Ausstattung) für das Gesamtsystem (inkl. Ersatzteil- u. Trainingspakete) Gimbal: Ja Frequenz: k.A. Antrieb: AvGas, Diesel, Benzin	Military-grade Drohne mit extrem hoher Leistungsfähigkeit und Reichweite mit kundenspezifischer Anpassung
Freefly Systems Alta UAV8: 	Abmessung: 132,5 × 132,5 × 50 cm (voll ausgefahren) Gewicht/Tragkraft: 6,2 kg / max. 18,1 kg Geschwindigkeit: 65 km/h (ohne Wind) Reichweite: 1,5 km Höhe, 5 km Dist. Flugzeit: Keine Zuladung 38 min, 7,5 kg Zuladung: 12 min Einsatz: -20°C bis +45°C Windwiderstand: 25-30 km/h	Preis: ab rd. 14.000 €(nur UAV-Basis) Gimbal: Ja (extra) Frequenz: 5.725 - 5.825 GHz 2.400 - 2.483 GHz Antrieb: Elektrisch	Profi-Drohne mit extrem hoher Leistungsfähigkeit und guter Kompatibilität zu vielen Sensoren
DJI Matrice 600 Pro: 	Abmessung: 167 × 152 × 73 cm (voll ausgefahren) Gewicht/Tragkraft: 10 kg / max. 15,5 kg Geschwindigkeit: 65 km/h (ohne Wind) Reichweite: 1,5 km Höhe, 5 km Dist. Flugzeit: Keine Zuladung 38 min, 5,5 kg Zuladung: 18 min Einsatz: -10°C bis +40°C Windwiderstand: 25-30 km/h	Preis: ab rd. 6.500 €(nur UAV-Basis) Gimbal: Ja (extra) Frequenz: 5.725 - 5.825 GHz 2.400 - 2.483 GHz Antrieb: Elektrisch	Profi-Drohne mit hoher Leistungsfähigkeit und sehr guter Kompatibilität zu vielen Sensoren
Yuneec Tornado H920+: 	Abmessung: 97 × 85 × 46 cm (voll ausgefahren) Gewicht/Tragkraft: Eigengewicht 5 kg Geschwindigkeit: 50 km/h (ohne Wind) Reichweite: 1,5 km Höhe, 5 km Dist. Flugzeit: Keine Zuladung 24 min, Einsatz: -10°C bis +40°C Windwiderstand: 30-35 km/h	Preis: ab rd. 2.200 € Gimbal: integriert Bild: integriert, 16 MP Video: 720p, 1080p, 4K Frequenz: 2,400 - 2,483 GHz 5,725 - 5,825 GHz Antrieb: Elektrisch	Kompakte Drohne mit guter Leistungsfähigkeit und begrenzter Kompatibilität
DJI Phantom 4 Pro V2.0: 	Abmessung: 40 × 40 × 35 cm (voll ausgefahren) Gewicht/Tragkraft: Eigengewicht 1,5 kg Geschwindigkeit: 50 km/h (ohne Wind) Reichweite: 1,5 km Höhe, 5 km Dist. Flugzeit: Keine Zuladung 30 min Einsatz: -10°C bis +40°C Windwiderstand: 30-35 km/h	Preis: ab rd. 1.600 € Gimbal: integriert Bild: integriert, 20 MP Video: 720p, 1080p, 4K Frequenz: 2,400 - 2,483 GHz 5,725 - 5,825 GHz Antrieb: Elektrisch	Kompakte Drohne mit guter Leistungsfähigkeit und begrenzter Kompatibilität

Legende: Selektive Auswahl nach Verbreitung und Eignung basierend auf diversen Drohmentests

2.3.1 Einsatzbereiche

2.3.1.1 Allgemeine Informationen zum Einsatz unbemannter Luftfahrzeuge in AT



Abbildung 11: Klassen von uLFZ in Österreich (eigene Grafik)

Bei der Bewilligung von unbemannten Luftfahrzeugen der Klasse 1 (mit Sichtverbindung) wird in erster Linie auf das Gefährdungspotential abgestellt. Die Bestimmungen unterscheiden Einsatzgebiete (unbebaut, unbesiedelt, besiedelt und dicht besiedelt) und Gewichtsklassen. Es sind drei Kategorien von unbemannten Luftfahrzeugen definiert (A, C, D). Danach richtet sich die Strenge der Auflagen (z.B. Leistungsparameter, Qualifikation des Piloten usw.).

	Einsatzgebiet		
	I unbesiedelt	II besiedelt	III dicht besiedelt
Betriebsmasse bis einschließlich 5 kg	A	C	
Betriebsmasse über 5 kg und bis einschließlich 25 kg	C		D
Betriebsmasse über 25 kg und bis einschließlich 150 kg	C	D	

Tabelle 26: Bewilligungskategorien von uLFZ in Österreich

Für den Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen über 5 kg Betriebsmasse im besiedelten Bereich gelten zudem erhöhte Anforderungen an die Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Sicherheit. Gemäß geltenden Vorschriften sind zumindest in Österreich zusätzliche Maßnahmen und Einbauten für redundante Systeme vorzunehmen. International gelten hierzu noch sehr unterschiedliche Regelungen, es gibt jedoch seit Jahren Vereinheitlichungsbestrebungen auf EU-Ebene, die aktuell in den finalen Prozess gelangen.

Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 2 (UAV ohne Sichtverbindung) werden wie Zivilluftfahrzeuge zertifiziert und zugelassen. Die Erfüllung von entsprechend umfassenden Bauvorschriften, Musterprüfung und vieles mehr sind notwendig. Derzeit befinden sich UAV dieser Klasse noch größtenteils in Erprobung und wird dies aktuell in Österreich nur von einem Hersteller (Schiebel Industries) in dieser Form verfolgt bzw. betrieben. Für die Zukunft ist jedoch zu erwarten, dass wesentlich mehr Unternehmen in diesem Anwendungsfeld tätig werden.

Seit 2019 besteht eine **neue Durchführungsverordnung** (EU) 2019/947 der Kommission über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge:

Diese wurde mit 11.06.2019 im EU-Amtsblatt verlautbart, tritt mit 1.7.2019 in Kraft. Die Gültigkeit beginnt ab 1.7.2020 mit einer Übergangsregelung von 1.7.2020 bis 31.05.2022.

1) **COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft**

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uris-erv:OJ.L_.2019.152.01.0045.01.ENG&toc=OJ:L:2019:152:TOC

Text direkt als PDF (insbesondere relevant für Kategorien "open" und "specific"):

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&from=EN>

2) **COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems**

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uris-erv:OJ.L_.2019.152.01.0001.01.ENG&toc=OJ:L:2019:152:TOC

Text direkt als PDF:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0945&from=EN>

Einige ausgewählte Punkte aus dem Regelwerk hier aufgegriffen:

Die damit einhergehende Festlegung der drei Betriebskategorien „open“, „specific“ und „certified“ soll sich auf das Kriterium der Höhe des Risikos sowie auf weitere Kriterien stützen.

Für den UAS-Betrieb sollen abhängig von der Höhe des jeweiligen Risikos, den Betriebsmerkmalen des betreffenden UAV und den Merkmalen des Betriebsbereichs Anforderungen an die Risikominderung gelten.

Der Betrieb in der „specific“ Kategorie soll für mit höherem Risiko behaftete Betriebsarten gelten, für die eine eingehende Risikobewertung durchgeführt werden soll, um festzustellen, welche Anforderungen für den sicheren Betrieb notwendig sind.

Es sind darin u.a. Vorschriften und Verfahren betreffend Standardszenarien mit Risikominderungsmaßnahmen, für die Kennzeichnung und Identifizierung unbemannter Luftfahrzeuge sowie die

Registrierung der Betreiber und Bewertung des Betriebsrisikos vorgesehen. In diesem Zusammenhang ist auch die aktuelle Thematik SORA (Strategic Operations Risk Assessment) sowie U-Space (Regelungen betreffend Lufträume) zu sehen. Diese erweitern die legislative Basis an Regularien, welche für den künftigen Einsatz von UAS von Bedeutung sein werden.

2.3.2 Anwendungsfälle und -potentiale im Bereich Infrastruktur

Die Zahl an möglichen Einsatzfeldern von UAS im Bereich Infrastruktur ist sehr breit, aber nicht alle davon heben sich substantiell von herkömmlichen Methoden ab. Im Sinn der Projektziele wird versucht, jene Anwendungsfälle rauszugreifen die einen Mehrwert in Bezug auf höhere Erfassungsqualität, Informationsgewinn sowie Sicherheit und letztlich Effizienz im Vergleich zu herkömmlichen Methoden generieren.

Wesentliche Einsatzbereiche in diesem Sinn sind die Unterstützung bei der Inspektion, Vermessung, Zustandserfassung, -prüfung und -beurteilung von Infrastruktur- und Industrieanlagen sowie Bauwerken und Baustellen im Bereich Straße, Schiene und Energie. Eine vorausschauende Inspektion (Stichwort „Predictive Maintenance“) wird insbesondere bei Brücken (außen sowie bei Pfeilern größeren Ausmaßes auch innen), Schutzverbauungen und anderen größeren Konstruktionen primär aus Stahl und Stahlbeton durch Einsatz von hochwertigen UAS-Systemen unterstützt. In schwer zugänglichen Bereichen sind die grundsätzlichen Vorteile einer luftgestützten Erfassung evident und können zudem je nach Bedarf mit terrestrischen Aufnahmen ergänzt werden. Die Möglichkeit der exakten Wiederholbarkeit von Flugrouten und Erfassungsräumen erhöht die Aussagequalität der gelieferten Informationen und Vergleiche.

Die so erfassten Objekte und Ereignisse können durch entsprechende Visualisierung, z.B. in digitalen 3D-Modellen für den Anwender bereitgestellt werden. Eine Erfassung, Vermessung und Visualisierung des Bewuchses von Leitungstrassen mittels UAS liefert umfangreiche Informationen, z.B. auch für Ausmaß und Zeitpunkt notwendiger Schlägerungsarbeiten. Ob dies mittels UAV Airborne Laserscanning oder mittels Photogrammetrie erfolgt, hängt u.a. von den gewünschten Ergebnissen bzw. Einsatzort, Zeitpunkt und Vegetation sowie Zielgenauigkeit ab.

Zur Projektfortschrittskontrolle und -dokumentation können UAS ebenso sinnvoll eingesetzt werden wie zur Inventur von Rohstoffaußenlagern und Volumenberechnungen. Eine UAS basierte Errechnung von digitalen 3D Oberflächenmodellen (DOM, DGM) inklusive Volumens- und Änderungsberechnungen (Massenbilanzen) begleiten die Überwachung von Geländebewegungen und Hangrutschungen und tragen zur Kontrolle von Naturgefahren bei. Hocheffiziente, drohnen-gestützte Baumfallanalysen ergänzen diesen Einsatzbereich. Durch Analyse der Pflanzenvitalität (z.B. NDVI Indices) und -gesundheit können rechtzeitig Rückschlüsse auf Pflanzenstresslevels, Schädlingsbefall, Totholz gezogen und rechtzeitig vor einem Ausfall bzw. Betriebsstörungen Gegenmaßnahmen gesetzt werden.

Zukunftstrends:

Die Erstellung einer einfachen Flugplanung und Übernahme in die UAS ist bereits verbreitet, ebenso der darauf aufbauende Wegpunktflug. Eine hohe Präzision und Zuverlässigkeit solcher Flugplanungen ist ein kritischer Erfolgsfaktor für Sicherheit (Umfeld und Gerät) sowie für eine ausreichend hohe Qualität der Ergebnisse der Datenerhebung. Entwicklungs- sowie Forschungsbedarf besteht jedoch hinsichtlich einem weitgehend autonomen bzw. automatisierten Erkennen von ungeplanten Hindernissen und Ereignissen und wie das UAS darauf reagiert bzw. reagieren soll. Die Themen „Sense & Avoid“ bzw. „Detect and avoid“ in diesem Zusammenhang sind seit einigen Jahren als wichtige Fragestellungen identifiziert, die es im Bereich des autonomen

Fahrens sowie ebenso auch autonomen Fliegens außerhalb des Sichtbereiches (BVLOS) zu lösen gilt. Lösungsansätze sind zum Teil szenariobasiert, andere wiederum eher regelbasiert.

Einer laufenden Überprüfung der Aufnahmen (Fokus, Abdeckung, Überlappung) kommt primär aus Effizienzgründen eine Bedeutung zu. Eine ansatzweise automatisierte Auswertung der erfassten Bilddaten bzw. Laserscans und Erstellung von Punktwolken, Meshes und texturierten 3D – Modellen ist für einfache, wenig anspruchsvolle Fälle mittels Standardsoftware (Kap. 3.3.2) bereits möglich. Dies trifft jedoch nur eingeschränkt für davon abweichende Anforderungen und Prozessierung und Auswertung von Daten mit spezifischer Sensorik (Thermografie, Multispektalanalyse) zu, da diese vom jeweiligen Anwendungsfall abhängen. In der Forschung und Entwicklung zu diesem Thema bzw. der automatisierten Datenauswertung und -analyse liegt daher ein wesentlicher Schwerpunkt der zukünftigen Weiterentwicklung.

Augmented Reality Lösungen, also der computergestützten Erweiterung der Realitätswahrnehmung, werden weiter an Bedeutung gewinnen. Dies beispielsweise in Bereichen in denen digitale Planungsdaten mit realen Geometrien oder Konstruktionen abgeglichen werden sollen, oder für Prüfungen relevante Daten online eingespielt werden können.

Die vieldiskutierte Thematik von **Beyond Visual Line Of Site (BVLOS)** Flügen (vgl. Kapitel 9 Zusammenfassung und Ausblick, unter Ausblick, Beyond Visula Line Of Site (BVLOS-Flüge), also Flügen außerhalb des Sichtbereiches, ist derzeit aufgrund gesetzlicher Reglementierungen nur wenigen Unternehmen und Organisationen vorbehalten. Es werden jedoch mittelfristig auch in diesem Bereich die technischen Voraussetzungen (vgl. oben sowie Forschung zum Thema Sense & Avoid, Hinderniserkennung) sowie parallel auch die legislatischen Voraussetzungen geschaffen werden. Somit wird auch enormes weiteres Potential für Anwendungen im Bereich der Infrastruktur (v.a. Straße, Schiene, Leitungstrassen über weitere Strecken) gehoben werden.

In diesem Zusammenhang werden auch **Überwachungsdienstleistungen** für kritische Infrastruktur an Bedeutung gewinnen. 24/7-Überwachung, Vernetzung bodenbasierter Sensoren mit jenen am UAV, sowie Echtzeitkommunikation mit Leitständen sind weitere Themen der nahen UAS-Zukunft. Ebenso wird eine Öffnung von Flügen außerhalb des Sichtbereiches den Markt für **Transportdienstleistungen** (Bauteile, Ersatzteile, Pakete) mittel- bis längerfristig öffnen. Aktuell erfolgt das nur in Ländern, in denen die gesetzlichen Regelungen dies bereits in hohem Maße zulassen (primär arabischer, afrikanischer und zum Teil asiatischer Raum).

2.3.3 Sensortypen, Parameter und Kosten

Moderne UAV für den Einsatz im Bereich Industrie und Infrastruktur werden mit einem, idealerweise mehreren untereinander vernetzten, gleichzeitig agierenden Sensoren bestückt. So genannte Sensorboxen vereinen ein geballtes Set an Sensortechnologie mit 3-4 Sensoren auf kompaktem Raum. In vielen Fällen kann die Hardware und Elektronik bereits auf 20x20x15 cm ihren Platz finden, was insofern wesentlich ist, als Gewicht und Abmessungen des Payload maßgebend das Einsatzgebiet und die Flugdauer beeinflussen. Folgende Typen an Sensoren kommen aktuell in UAV standardmäßig zum Einsatz:

- LIDAR (light detection and ranging) zur Kollisionsvermeidung und Navigation, auch als 3D-Scanner.
- Inertiale Messeinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) zur Navigation
- GPS bzw. RTK (Real Time Kinematik) zur Positionsbestimmung
- Radar für Navigation und Kollisionsvermeidung
- Abstandsmesser für Kollisionsvermeidung und Navigation
- Kameras für Daten- und Situationserfassung, Navigation und Kollisionsvermeidung

- Bewegungsmelder
- Drucksensoren zur Datensammlung, ebenso zur Navigation
- und einige andere

Je nach Bedarf werden unterschiedliche Formen der Konnektivität verwendet. Es ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen Sensoren für die Navigation und unterschiedlichsten Sensoren für die Erfassung von Umfeldbedingungen / Umgebungsdaten. Die für das Forschungsprojekt RISKMON relevanten und in Laborversuchen ausführlich untersuchten Detektionsmöglichkeiten der entsprechenden Sensoren sind in Kap. 4.2 ausführlich dargestellt.

Sensoren für die Navigation:

Ein wesentlicher Bestandteil eines UAS und zentrales Element für eine erfolgreiche und präzise Navigation sind **Bewegungssensoren**. Dabei sind vor allem **Beschleunigungssensoren**, **Drehratengeber** (Gyroskop) sowie **Magnetkompass** und barometrischer **Drucksensor** zu nennen. Der Beschleunigungssensor erfasst die Beschleunigung der Drohne in X-, Y- und Z-Richtung und bestimmt zusätzlich den Neigungswinkel im stationären Zustand. Ebenso wird die lineare Beschleunigung in horizontaler und vertikaler Richtung erfasst. Damit können Geschwindigkeit, Richtung, Höhenänderungsrate sowie Vibrationen einer Drohne bestimmt werden.

Der auch als Gyroskopsensor bezeichnete Drehratengeber erfasst die Winkelgeschwindigkeit um drei Achsen. Änderungen der Winkelinformationen werden genutzt, um die Drohne zu stabilisieren und vom Taumeln abzuhalten. Entsprechend aufbereitete Daten aus dem Gyroskopsensor werden den Motortreibern zugeführt, welche die Drehzahl der Motoren dynamisch anpassen, um die Drohne in einer stabilen Fluglage zu halten. Ein Trägheitsnavigationssystem oder inertiales Navigationssystem (engl. Inertial Navigation System), kurz INS, ist ein 3-D-Messsystem mit einer inertialen Messeinheit (engl. Inertial Measurement Unit, IMU) als zentraler Sensoreinheit mit mehreren Beschleunigungs- und Drehratensensoren. Diese erkennen Bewegungsrichtung sowie Neigungswinkel und sind wesentlich für die Kontrolle des Fluggerätes.

Durch Integration der von der IMU gemessenen Beschleunigungen und Drehraten wird in einem INS laufend die räumliche Bewegung des Luftfahrzeugs und daraus die jeweilige geografische Position bestimmt. Der Hauptvorteil eines INS ist, dass dieses referenzlos betrieben werden kann, also unabhängig von jeglichen Ortungssignalen aus der Umgebung.

Ein Magnetkompass wiederum ermöglicht der Drohne das Erkennen von Richtungen. Er gibt die Stärke des auf den Baustein wirkenden Magnetfelds in X-, Y- und Z-Richtung an. Ein Magnetfeldsensor wird auch zum Detektieren von ferromagnetischen Werkstoffen in der Umgebung verwendet (zum Beispiel von Strommasten und -leitungen, Fahrzeugen oder anderen UAV), um damit Kollisionen zu vermeiden.

Das Funktionsprinzip eines Barometers besteht darin, den atmosphärischen Druck in eine Höhenangabe umzuwandeln. Die Barometerdaten helfen dem UAV beim Navigieren und beim Erreichen der gewünschten Höhe. Eine sehr gute Abschätzung der Steig- und Sinkrate ist sehr wichtig für die Flugsteuerung eines UAV.

Sensoren für die Erfassung der Umfeldbedingungen:

- Laserscanner / LIDAR
- Wärmebild-/Nachtsicht-/ Infrarotkamera
- NIR (Nahes Infrarot)
- Multispektralkamera
- Temperatur-, Schall-, Strahlungs-, Gassensoren
- Radar, Bodenradar (Ground Penetrating Radar-GPR)
- Synthetic Aperture Radar
- Korona
- Sensorbox (3-4 Sensoren)
- Visuell: digitale Foto-, Videokamera (RGB)



Abbildung 12: Gängige Sensoren in UAV-Systemen (keine relativen Größenverhältnisse)

Visuelle RGB Sensoren:

Um eine entsprechende Bodenauflösung (GRD) vor allem im Bereich Inspektion von Bauwerken zu erreichen, sind Sensoren mit Auflösungen ab 36 MP aufwärts, besser 42 MP notwendig. In vielen Fällen werden Vollformatkameras der gängigen Hersteller eingesetzt. Die Objektivwahl erfolgt, wie auch bei herkömmlichen terrestrischen Einsätzen je nach Anforderung (Detailaufnahmen vs Orthofoto mit hoher Überlappung), häufig zwischen 24 mm und 85 mm Brennweite.

LIDAR:

In den letzten Jahren sind die Anforderungen an Laserscanner auf UAV sowohl im Hinblick auf die in der Vermessungstechnik geforderte Genauigkeit als auch hinsichtlich Möglichkeiten der Systemintegration massiv gestiegen. Durch die parallel erfolgte Gewichtsoptimierung der am Markt befindlichen Geräte sind diese für den UAV-Einsatz im Bereich Infrastruktur und Industrie sehr attraktiv geworden. Bereits in der UAV Gewichtsklasse bis 15 kg können, eine entsprechende Gewichtsoptimierung an allen Komponenten vorausgesetzt, Genauigkeiten von 5 mm (Precision, also Ausmaß der Wiederholbarkeit der gleichen Messung) und 10 mm (Accuracy) erzielt werden. Bei höheren UAV-Gewichtsklassen können LIDAR-Sensoren eingesetzt werden, deren Leistungsfähigkeit darüber hinaus reicht. Messraten von über 500.000 Messungen pro Sekunde (550 kHz) liefern die Basis für hochwertige Ergebnisse und Analysen.

Beide Technologien, sowohl Fotogrammetrie als auch LIDAR weisen Vorteile als auch Nachteile auf, eine Entscheidung für die Wahl wird von der Ergebniserwartung abhängen. Der Vorteil von Lidardaten ist insbesondere die genaue Positionsbestimmung der Messpunkte als Basis für die Rekonstruktion der Geometrie. Dafür ist die Auflösung d.h. die Anzahl der Messpunkte je

Flächeneinheit wesentlich unter jener von fotogrammetrischen Aufnahmen. Dementsprechend haben die jeweiligen Erfassungsmethoden ihre Einsatzberechtigung, wobei der Einsatz im Einsatzfall genau abzuwägen ist und die Aufnahmen auch kombinierbar sind.

Thermalkameras:

Im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung von Bauwerken kommen vermehrt auch Thermalkameras zum Einsatz. Auch hier haben die führenden Hersteller auf die boomende UAV-Industrie reagiert und trotz massiver Gewichtsreduktion der Geräte (zum Teil unter 200g), leistungsfähige Sensoren auf den Markt gebracht. Teilweise sind Thermalkameras sogar in Standardsysteme integriert, wodurch eine gleichzeitige Aufnahme in Kombination mit Bildern und Videos möglich wird. Neben der reinen Zustandserfassung ist dies insbesondere für Aufklärungsflüge z.B. bei Naturgefahren vor Lawinensprengungen oder der Personensuche für die Streckenfreigabe relevant.

Zum Einsatz kommende Nutzlasten auf UAV:

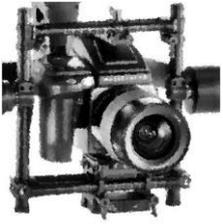
- Abwurfvorrichtungen
- Ersatzteilkpakete
- Hilfspakete, Medikamente
- Lautsprecher
- Box für Flugzettel u.a.

Mögliche Sonderbauten und Sonderanfertigungen sind ebenfalls auf Basis der offenen Schnittstellen in den UAS möglich, was eine weitergehende Integration von Sensoren oder Vorrichtungen (z.B. für die Lawinensprengung) ermöglicht. Die Überkopfmontage eines um 90 Grad schwenkbaren Gimbals (z.B. zur Erfassung von Bauwerksunterseiten, Bogenbrücken), eine Scheinwerferaufhängung, Staubschutz, Sensorbox mit mehreren untereinander vernetzten Sensoren, erhöhte Startrampen im Innenbereich von z.B. Brückenpfeilern oder Schächten um Staubaufwirbelung zu vermeiden, Abstandssensoren, Kollisionsvermeidungssysteme, Aufprallschutz, Notladesystem (Fallschirm), Rotorblattschutz, Leuchtsignal, Scheinwerfer (LED) sind hingegen bereits als Sonderausstattung von einigen Herstellern zu bekommen.

Für den semiprofessionellen Drohneneinsatz und im Hobbybereich kommen üblicherweise integrierte Systeme mit fest verbauter Kamera und Auflösungen zwischen Full HD (1920 x 1080 = 2 MP) oder UltraHD (3840x2160 = 8 MP) für Videos und 2 MP bis 16 MP für Fotos zum Einsatz. Für den professionellen bis industriellen Einsatz in UAVS hängt die Auswahl vom Erfassungsziel, dem Aufnahmebereich und der Zielauflösung sowie Aufnahmerichtung ab. Dementsprechend verstehen sich die eingesetzten UAV als Plattformlösung, auf der die entsprechenden Kamerasysteme schwenkbar (GIMBAL-basiert) angebracht werden können. Typische professionelle UAV – Sensoren im Bereich Fotogrammetrie/Video weisen derzeit eine Bildauflösung von 16 MP bis 100 MP auf. Eine bessere Kamera erlaubt einen größeren Aufnahmebereich bei gleichem Flugabstand bzw. eine höhere Auflösung bei gleichem Aufnahmebereich, was in der Flugplanung auf Basis der Zielauflösung entsprechend zu berücksichtigen ist. Die in

Tabelle 27 dargestellten UAV-Sensoren im Bereich Fotogrammetrie/Video stellen dementsprechend nur eine Auswahl zur Illustration der Bandbreite und Einsatzmöglichkeiten dar. Aufgrund der technischen Entwicklungen sind neben einer Verbesserung insbesondere eine Erhöhung der Bildauflösung sowie Reduktion der Preise für diese Sensoren in der Zukunft zu erwarten.

Tabelle 27: Übersicht willkürlich ausgewählte UAV-Sensoren Fotogrammetrie/Video

Bezeichnung	Spezifikationen	Sonstiges/Daten	Eignung
Hasselblad A6D-100C: 	Abmessung: 10,0 × 10,0 × 15,1 cm Auflösung (F): Optisch 100 MP Auflösung (V): 4K Ultra HD: 3840×2160 29.97p Sensorgröße: 53,4 x 40,0 mm Gewicht: 1.360 g Einsatz: -10°C bis +45°C Drohneneinsatz: Ja (Sehr geeignet)	Preis: ab rd. 35.000 € Gimbal: extra Speicher: MicroSD 128/256/512 GB Foto (F): RAW TIFF (8 bit) JPEG Video (V) RAW H.264 (25 fps)	Professionelle, mehrfach redundante UAV-Modelle ab ca.155 kg MTOW
Sony A7R mark III: 	Abmessung: 12,7 × 9,6 × 7,3 cm Auflösung (F): Optisch 42 MP Auflösung (V): UHD (max. 30 fps) Full HD (max. 120 fps) Sensorgröße: 35 mm Gewicht: 657 g (mit Objektiv) Einsatz: -10°C bis +45°C Drohneneinsatz: Ja, geeignet Waterproof	Preis: ab rd. 4.300 € Gimbal: Ja (extra) Speicher: MicroSD, SSD 128/256/512 GB Foto (F): RAW TIFF (8 bit) JPEG Video (V) Cinema RAW MP4, MOV MPEG4/H.264	Professionelle UAV-Modelle ab ca. 6 kg MTOW
DJI Zenmuse X5R: 	Abmessung: 13,6 × 12,5 × 13,1 cm Auflösung (F): Optisch 16 MP Auflösung (V): 4K UHD: 4.096 x 2.160 23,98p (max. 60 fps) Sensorgröße: 17,3 x 13,0 mm (f=15 mm) Gewicht: 583 g (mit Objektiv) Einsatz: -10°C bis +45°C Drohneneinsatz: Ja, geeignet	Preis: ab 3.000 € Gimbal: extra Speicher: MicroSD, SSD 128/256/512 GB Foto (F): RAW TIFF (8 bit) JPEG Video (V) Cinema RAW MP4, MOV MPEG4/H.264	UAV-Modelle ab ca. 6kg MTOW

Legende: Eigene Recherche und Darstellung auf Basis von Herstellerangaben

Die Thermografie ist ein bildgebendes Verfahren, bei der die Intensität der Infrarotstrahlung eines Punktes als Maß für die Temperatur dieses Punktes gedeutet wird. Thermokameras wandeln die unsichtbare Infrarotstrahlung in elektrische Signale um und erzeugen mit der Auswertelektronik ein Falschfarbenbild. Da für die Aufnahme der Infrarotstrahlung keine externen Lichtquellen erforderlich sind, eignet sich die Thermografie für Aufnahmen bei Nacht, die Detektion von Lebewesen sowie von relativen Temperaturunterschieden und Inhomogenitäten in Bauwerken. Die in UAV eingesetzten Thermokameras kommen meist als Kombinationslösung mit Foto/Videosensoren zum Einsatz und weisen in der Regel eine deutlich geringere Auflösung (typischerweise 640x480 = 0,3 MP) auf. Die in

Tabelle 28 dargestellten UAV-Sensoren im Bereich Thermografie illustrieren die Bandbreite und Kosten, wobei hier ebenso Entwicklungen vor allem in Hinblick auf eine höhere Auflösung zu erwarten sind.

Tabelle 28: Übersicht willkürlich ausgewählter UAV-Sensoren Thermografie

Bezeichnung	Spezifikationen	Sonstiges/Daten	Eignung*
 <p>FLIR CORONA 350 II</p>	<p>Abmessung: 35 cm (DM), 48cm Höhe</p> <p>Auflösung (F): Optisch 20 MP</p> <p>Auflösung (V): 4K Ultra HD: 3840x2160 29.97p</p> <p>Auflösung (IR): 640 x 480 (-40°/+2000°C)</p> <p>Spektralband: 7.5 - 13.5 µm</p> <p>Gewicht: 27 kg</p> <p>Drohneinsatz: Ja, geeignet</p> <p>Tilt: +20° to -120°, Pan: ±360°</p>	<p>Preis: > 150.000€</p> <p>Gimbal: 4-Achsen</p> <p>Speicher: MicroSD 64/128 GB</p> <p>Corona</p> <p>Detection: 3 x 10-18 watt/m² (Empfindlichkeit)</p>	<p>Professionelle UAV größerer Bauart mit > 404 kg MTOW</p>
 <p>DJI ZENMUSE XT2 (FLIR)</p>	<p>Abmessung: 12,4 × 11,3 × 12,7 cm</p> <p>Auflösung (F): Optisch 20 MP</p> <p>Auflösung (V): 4K Ultra HD: 3840x2160 29.97p</p> <p>Auflösung (IR): 640 x 512 (-25°/+135°C) ± 0.01°</p> <p>Spektralband: 7.5 - 13.5 µm</p> <p>Gewicht: 500 g</p> <p>Drohneinsatz: Ja, geeignet</p> <p>Tilt: +30° to -90°, Pan: ±320°</p>	<p>Preis: ab ca. 12.000 €</p> <p>Gimbal: Ja, kardanische Aufhängung inkludiert</p> <p>Speicher: MicroSD</p> <p>Foto (IR): JPEG, R-JPEG, TIFF</p> <p>Video (IR) Thermal 8 bit MP4 14 bit TIFF Sequence</p>	<p>Standard UAV</p>
 <p>FLIR Vue Pro R 640:</p>	<p>Abmessung: 5,7 × 4,5 × 4,5 cm</p> <p>Auflösung (IR): 640 x 512 (-25°/+50°C) ± 0.01°</p> <p>Spektralband: 7.5 - 13.5 µm</p> <p>Gewicht: 115 g</p> <p>Drohneinsatz: Ja, geeignet</p> <p>Tilt: +30° to -90°, Pan: ±320°</p>	<p>Preis: ca. 4.000 €</p> <p>Gimbal: Ja (extra)</p> <p>Speicher: MicroSD</p> <p>Foto (IR): JPEG, R-JPEG, TIFF</p> <p>Video (IR) Thermal 8 bit MP4 14 bit TIFF Sequence</p>	<p>Standard UAV</p>

Legende: Eigene Recherche und Darstellung auf Basis von Herstellerangaben

Das Laserscanning bezeichnet eine zeilen- oder rasterförmige Abtastung des Aufnahmebereiches mit einem Laserstrahl, wodurch sowohl die Geometrie, als auch die Reflexionsintensität erfasst werden können. Laserscans eignen sich sehr gut für die Erstellung terrestrischer Aufnahmen, digitale Geländemodelle und andere Vermessungsaufgaben. Multispektralaufnahmen werden können sowohl in der Fernerkennung, als auch der Schadensdetektion eingesetzt werden und geben die sichtbare und nicht sichtbare Bandbreite des Lichtwellenspektrums wieder. Eine Auswahl der jeweiligen Sensoren für den Einsatz in UAS findet sich in Tabelle 29 und Tabelle 30.

Tabelle 29: Übersicht ausgewählte UAV – Sensoren Laserscanning (Lidar)

Bezeichnung	Spezifikationen	Sonstiges/Daten	Eignung
 <p>VUX-1 UAV (Riegl)</p>	<p>Abmessung: 22,7 x 20,9 x 12,9 cm</p> <p>Abtaste (L): 500.000 Messungen/s</p> <p>Reichweite: 920m</p> <p>Schrittweite: 0,006 – 1,5°</p> <p>Genauigkeit: 5 mm (Precision), 10mm (Accuracy)</p> <p>Gewicht: 3,8 kg</p> <p>Drohneinsatz: Ja, geeignet</p> <p>Sichtfeld 330°</p>	<p>Preis: ab ca. €180.000 (inkl. IMU, SW)</p> <p>IMU: Applanix APX-20</p> <p>Laser PRR: 550 kHz</p> <p>Speicher: 250 GB SSD oder LAN-TCP/IP</p>	<p>UAV mit > 16-20 kg MTOW</p>

SURVEYOR ULTRA (YellowScan) - NEU 	Abmessung: 17,8 x 10,4 x 14 cm Abtastrate (L): 600.000 Messungen/s Reichweite: 200m Schrittweite: 50 mm (Precision), 100 mm (Accuracy) Genauigkeit: 1,7 kg Drohneneinsatz: für Infrastruktur nur bedingt Sichtfeld 360°	Preis: n.a. IMU: APX-15 Laser PRR: 100 kHz Speicher: n.a. Multitechotechnologie	Standard UAV
miniVUX-1UAV (Riegl) 	Abmessung: 12,4 x 11,3 x 12,7 cm Abtastrate (L): 100.000 Messungen/s Reichweite: 80 – 120 m Schrittweite: 0,05 – 0,5° Genauigkeit: 10 mm (Precision), 15 mm (Accuracy) Gewicht: 1,6 kg Drohneneinsatz: wenig geeignet f. Infrastruktur Sichtfeld 360°	Preis: ab ca. 80.000 (inkl. IMU, SW) IMU: Applanix APX-20 Laser PRR: 110 kHz Speicher: 128 GB SDHC/SDXC	UAV ab 10 kg MTOW

Legende: Eigene Recherche und Darstellung auf Basis von Herstellerangaben

Tabelle 30: Übersicht ausgewählte UAV – Sensoren Multispektralaufnahmen

Bezeichnung	Spezifikationen	Sonstiges/Daten	Eignung*
Tetracam MCAW: 	Abmessung: 11,5 x 8,0 x 6,8 cm Auflösung (MS): 1280x1024 Spektralband: 380 – 1000 nm Gewicht: 600 g Drohneneinsatz: Ja, geeignet	Preis: ab ca. €25.000 Gimbal: extra Speicher: bis zu 1 TB	Standard UAV
Leica RCD30: 	Abmessung: 23,8 x 12,8 x 12,8 cm Auflösung (MS): Optisch 80 MP 10320 x 7752 CCD 80 MP (1,25 Sec/Bild) Spektralband: 780 – 880 nm Gewicht: 3.900 g Drohneneinsatz: Ja, begrenzt geeignet Tilt: +30° to -90°, Pan: ±320°	Preis: n.a. Gimbal: extra Speicher: MicroSD, SSD 128/256/512 GB	Professionelle UAV mit MTOW > 16 kg

Legende: Eigene Recherche und Darstellung auf Basis von Herstellerangaben

2.3.4 Datenauswertung und Aufbereitung

Einer der wesentlichsten Schritte in der Auswertung der Daten eines UAV Einsatzes ist die Erstellung von qualitativ hochwertigen (Zwischen-)Produkten, wie z.B. Orthofotos, Punktwolken und einiges mehr. Je nach Flugmethodik kommen unterschiedliche Softwaresysteme zum Einsatz, da z.B. Image Matching und Laserscanning sehr unterschiedliche Ausgangslagen und damit auch Algorithmen benötigen. Nach dem Erstellen eines Produktes muss dieses noch ausgewertet, analysiert und je nach Einsatzgebiet aufbereitet und konvertiert werden, um die Anforderungen der Kunden zu erfüllen bzw. die Ergebnisse in die Bestandssysteme zu integrieren. Ein zentraler Bestandteil der Auswertung und Aufbereitung ist die Qualitätssicherung in Bezug auf die Kundenanforderung (z.B. Format, Geometrie, Auflösung, Vollständigkeit etc.).

Die einzelnen Softwarelösungen unterscheiden sich durch die Qualität des fertigen Produkts, die Möglichkeiten zur Qualitätskontrolle, die Effizienz der verwendeten Algorithmen, die Unterstützung verschiedener Hardware, die Benutzerfreundlichkeit und die Möglichkeiten der weiteren Auswertung. Durch das steigende Aufkommen von UAV im hobby- bzw. semi-professionellen Bereich, dem Preisverfall sowie Softwareentwicklung, hat sich auch die Anzahl der Anbieter entsprechender Dienstleistungen stark erhöht. Viele darauf aufbauende benutzerfreundliche Softwaretools und Services versprechen eine einfache und schnelle Prozessierung, ermöglichen jedoch nur einen sehr begrenzten Eingriff oder Anpassung an spezifische Anforderungen. Sind Lösungen für spezielle Anwendungsfälle oder erschwerte Bedingungen bzw. mit sehr hoher Auflösung gefordert, reichen Standardsoftware und PC-Systeme meist nicht mehr aus. Wird die Prozessierung dagegen über Cloudservices ausgeführt, ist neben einer entsprechenden Internetverbindung und Eingriff in die Prozessierung die Frage des Datenschutzes zu beantworten.

Ein wesentlicher Teil der standardisierten Softwarelösungen im Bereich UAV Daten erlaubt eine fotogrammetrische Auswertung basierend auf der Methode des Image Matching (Kap. 3.3). Dabei wird eine Reihe standardisierter Schritte ausgeführt, die bei den einzelnen Anbietern weitgehend ident sind, die sich jedoch in Bezug auf die Geschwindigkeit der Prozessierung, die Genauigkeit und Artefakte wesentlich unterscheiden können. Der zentrale Schritt ist die Berechnung von Features oder Merkmalen, die in mehreren Fotos vorhanden sind und zusammen mit den GPS-Daten der Aufnahme eine räumliche Lagebestimmung ermöglichen. In weiteren Schritten wird die so entstandene Punktwolke verdichtet (dense point cloud), ein dreidimensionales Modell auf Basis von Dreiecksnetzen errechnet (mesh) und die Oberflächeneigenschaften aus Bildern zugeordnet (textured mesh). Hier eine zusammenfassende Auflistung der Auswertungsschritte:

- Feature Extraktion und Matching:
 In diesem Schritt werden lokale Merkmale in Bildern detektiert und mit entsprechenden Merkmalen aus anderen Bildern verknüpft. Für diesen Schritt kommt standardmäßig der SIFT Algorithmus (Lowe 1999) zum Einsatz.
- Kamera Orientierungsparameter:
 In einer Bündelblockanpassung werden die Näherungsparameter der Kameraposition bzw. -orientierung gemeinsam mit den erfassten Features ausgeglichen und rückgerechnet. Für höhere Genauigkeit können hier vorher eingemessene Punkte (Ground Control Points – GCP) berücksichtigt werden.
- Dense Image Matching:
 In diesem Schritt werden alle Pixel, sowie die Orientierungsparameter und Position der Bildaufnahmen berücksichtigt und eine dichte Punktwolke (dense point cloud) berechnet.
- Mesh Generation:
 In diesem Schritt wird aus Punktwolken eine Oberfläche bestehend aus einem Dreiecksnetz generiert. Weitere Algorithmen erlauben eine automatisierte Schließung von Fehlstellen, Löchern und Ausreißern sowie Optimierung der Oberfläche des 3D - Modells.²⁵
- Texturing:
 Die Extraktion von Bildinformationen und Projektion auf die Oberfläche von 3D – Modellen nennt sich Texture Mapping. Eine hochauflösende Textur ist wesentliche Voraussetzung für realistische 3D – Modelle.
- Surface and line extraction:
 Die Extraktion zusammenhängender Oberflächen, Kanten und Linien ist wesentlich für den

²⁵ vgl. LADICKY, L. et al. (2017)

Ableich der erfassten Realität mit CAD-Plänen und BIM bzw. der Ermittlung von Verdrehungen, Durchbiegung und Verformung.

- Preprocessing and Condition Assessment:

Die Voraussetzung für die Schadensextraktion ist ein Preprocessing, um störende Artefakte zu entfernen. Die Extraktion von Zustandsmerkmalen wie Risse, Ausbrüche, Abplatzungen und Korrosion mit entsprechenden Algorithmen nach Ausmaß und Schwere ist Voraussetzung für die Schadensbeurteilung und den sich daraus ergebenden Mehrwert für Betreiber.

Je nach Softwarelösung werden einer oder mehrere der genannten zusätzlichen Auswertungsschritte angeboten. Moderne Softwarelösungen bieten alle Bearbeitungsschritte bis zur Erstellung und Export texturierter 3D – Modelle (Kap. 3.8). Die Erkennung von Oberflächen, Kanten und Linien sowie messtechnische Auswertung und Anpassung ist zum Teil mit weiteren Softwaretools möglich (z.B. Autodesk Civil3D, Polyworks Metrology Suite etc.). Die flächige Schadensdetektion ist in keinem bekannten kommerziellen Softwaretool abgebildet und erfordert spezifische Lösungen und Algorithmen für jedes Schadensmerkmal. Dementsprechende Algorithmen (z.B. Neural Networks, deep learning etc.) sind daher zurzeit nicht kommerziell erhältlich und müssen für viele Schadensmerkmale erst entwickelt werden (z.B. in Matlab, TensorFlow etc.). Für eine effiziente Auswertung und Nutzung der Daten über schön anzusehende 3D – Modelle hinaus sind die letztgenannten Punkte entscheidend.

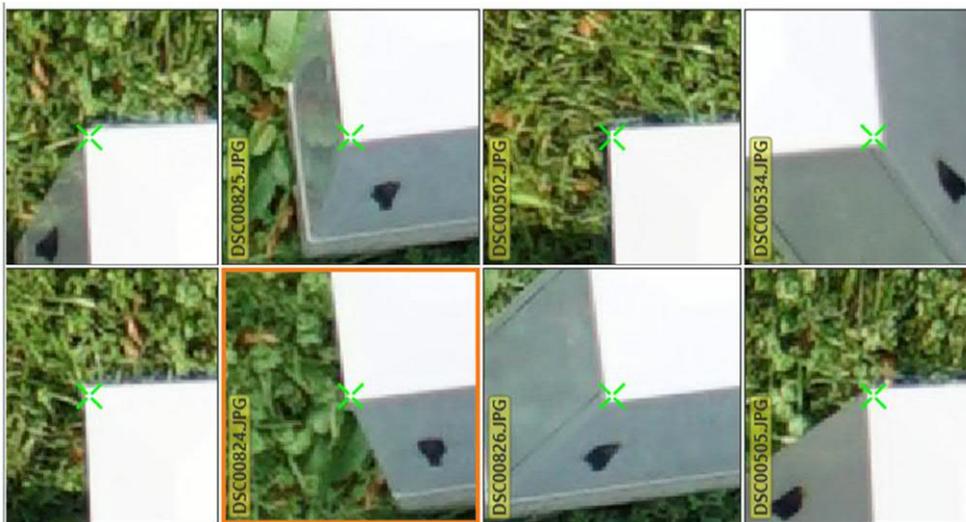
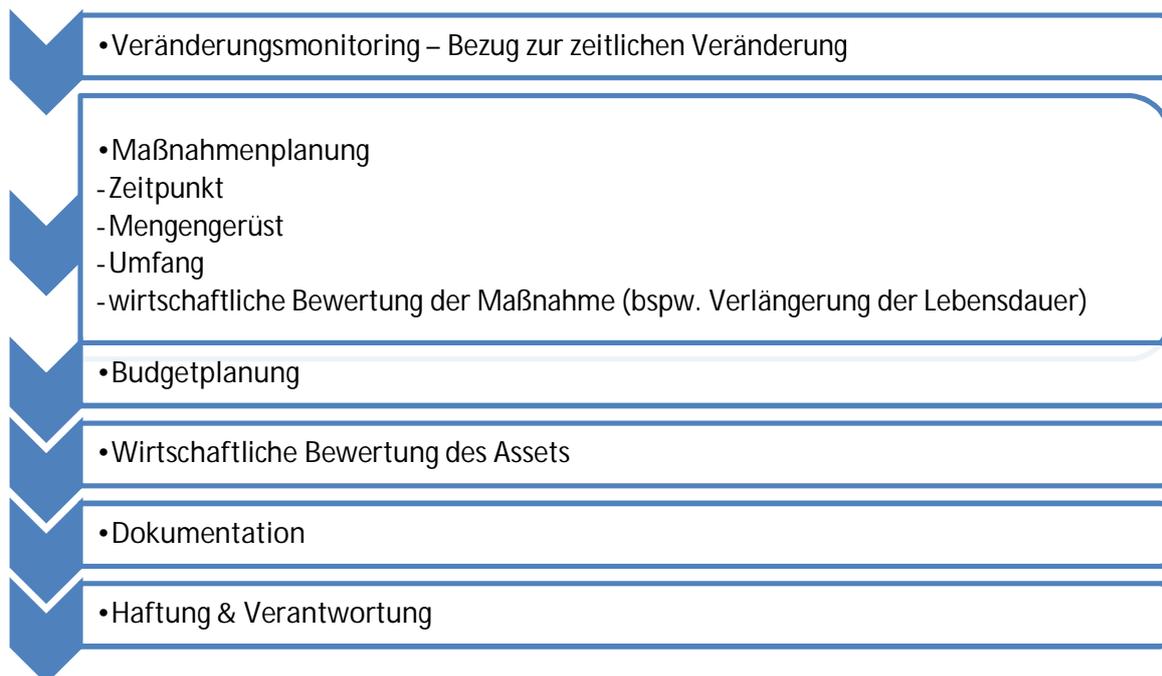


Abbildung 13: Image Matching Feature in mehreren Bildern

2.3.5 Integration Asset Management

Wie in Kap. 2.1 beschrieben ist die Bestands- und Zustandserfassung lediglich der erste Schritt im Asset Management Zyklus. Eine messtechnische Zustandserfassung mit Hochleistungsdrohnen und Sensorik wird in der Regel eine wesentlich bessere Basis für Zustandsprognose, Maßnahmenoptimierung und Umsetzung schaffen. Gemessen an den bisher verwendeten einfachen empirischen Zustandserfassungen bzw. Einschätzungen mit geringem Aufwand ergibt sich demgemäß bezogen auf die Erfassung nur im Ausnahmefall eine relevante Einsparung. Für echte wirtschaftlicher Vorteile ist vielmehr eine Gesamtbetrachtung des Asset Management mit Einbettung in (weiterentwickelte) Bestandssysteme und Prozesse der Betreiber entscheidend (Tabelle 31):

Tabelle 31: Mehrwert mobiler Sensorik im Asset Managements – mögliche Themenbereiche



Entscheidend bei der Integration der Bestands- und Zustandserfassung mittels UAV ins Asset Management der Betreiber sind klare Vorgaben für Datenqualität (Auflösung, Umfang), Kompatibilität (Format, Referenzieren) sowie Auswertung (Modellextraktion, Schadensdetektion). Betrachtet man den Gesamtprozess und alle Anforderungen aller Stakeholder im Prozess ist eine möglich einfache, standardisierte Handhabung, Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse entscheidend. Werden diese Aspekte nicht von vorneherein in Konzeption, Ausschreibung und Umsetzung berücksichtigt, werden in erster Linie große Datenmengen ohne echten Mehrwert für den Betreiber produziert.

Zusammenfassend kann eine hochgenaue Bestands- und Zustandserfassung mittels UAV nur dann zufriedenstellend erfolgen, wenn die Anforderungen aus und die Integration in den Gesamtprozess klar definiert sind. Weiters müssen die qualitätsgesicherten Daten und Auswertungen nachvollziehbar dokumentiert und in die notwendigen Formate und Ergebnisdarstellungen umgesetzt werden. Im Forschungsprojekt RISKMON wird daher auf einen ganzheitlichen Zugang sowie beispielhafte Implementierung der Ergebnisse besonders Wert gelegt. Aufgrund des schieren Umfangs der Thematik ist eine Umsetzung aller Anforderungen in einem Forschungsprojekt schlicht nicht machbar. Vielmehr wird sich eine schrittweise Umsetzung eines Gesamtkonzeptes aufbauend auf die Anwendungsbeispiele und Ergebnisse von RISKMON empfehlen.

3 Datenverarbeitung und Integration

3.1 Datenbanken Asset Management

3.1.1 Datenverarbeitungskonzept

In RISKMON wird der gesamte Weg von der Datenerfassung und -auswertung bis zur Integration in die Bestandssysteme des Infrastrukturmanagements, im Sinne eines (teil-) automatisierten Gesamtsystems, analysiert und konzipiert. RISKMON zeigt einen Weg auf, wie die erhobenen Daten in die führenden Bestandssysteme, wie beispielsweise geographische Informationssystem bzw. Objektdatenbanken, integriert werden können. Zur Veranschaulichung wird beispielhaft der gesamte Weg der Datenerfassung und Auswertung bis hin zur Integration der Ergebnisse in das Infrastrukturmanagement von ÖBB und ASFINAG gezeigt.

Die erhobenen Informationen können in Prüfberichten, mit Dokumentation (Fotos, Beschreibung) allfälliger Vorkommnisse und einer Benotung von Anlagen bzw. Anlagenteilen gemäß dem Schulnotenprinzip sowie Empfehlungen hinsichtlich der weiteren Vorgehensweise, münden. Darauf aufbauend kann eine systematische Planung, Priorisierung und Umsetzung entsprechender Maßnahmen im Rahmen des Erhaltungsmanagements erfolgen.



Abbildung 14: Schritte von der Datenaufnahme bis zur Visualisierung

- **Anforderungsdefinition**
 Im ersten Schritt werden die Anforderungen an das Aufnahmesystem sowie an das erwartete Ergebnis festgelegt. In diesem Prozess werden auch die Sensorsysteme definiert, die zum Einsatz kommen sollen. Die Kombinationen der Sensorik hängen von den erwarteten Ergebnissen ab. Weiters werden unter anderem die zu liefernden Datenformate, die gewünschte Genauigkeit, die Auflösung bei Bildaufnahmen, die Punktedichte bei den Laseraufnahmen und das Koordinatenreferenzsystem definiert.
- **Erhebung**
 Bei der Erhebung kommen Sensorsysteme zum Einsatz, mit denen die angeforderten Ergebnisse erreicht werden können (siehe dazu Punkt Sensoren).
- **Anlieferung**
 Im Anlieferungsprozess werden die erhobenen Geodaten auf die Erfüllung der im ersten Prozess definierten Anforderungen formal überprüft. Weiteres werden die Geodaten um Metadaten angereichert. Die Eingabe von Metadaten hilft bei der Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und der Strukturierung der gelieferten Artefakte. Die Erstellung der Metadaten kann mittels eines Eingabetools unterstützt werden. Es werden Metadaten auf drei Ebenen eingegeben, die den ISO-19115 entsprechen:

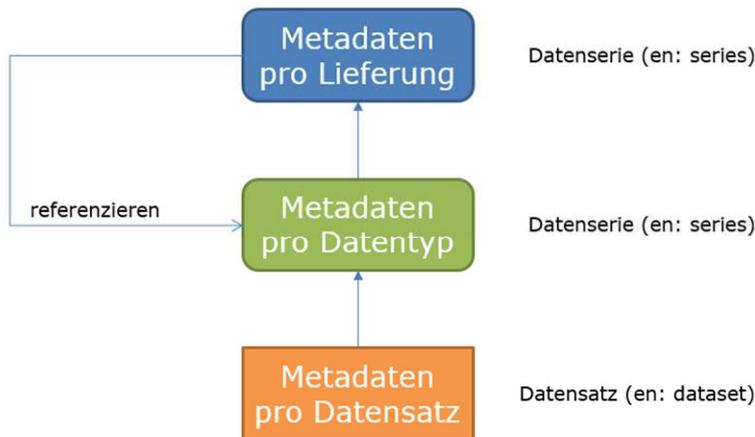


Abbildung 15: Datenverarbeitung

- Lieferebene:
Die Metadaten auf der Lieferebene beschreiben die gesamte Aufnahme. Auf dieser Ebene werden unter anderem das Datum der Aufnahme und die Kontaktdaten des Unternehmens, das die Aufnahme durchgeführt hat, eingetragen.
 - Datentypenebene:
Datentypen sind Datenserien aus einem Sensorsystem, zum Beispiel entsteht aus den Aufnahmen eines Laserscansensorsystems eine Punktwolke-Datenserie. Jeder Datentyp besitzt ein Set an erforderlichen Metadaten. Es werden Angaben zu Punktedichte, Auflösung, Genauigkeiten, Datenformate und räumliche Ausdehnung eingegeben.
 - Datensatzebene:
Die Metadaten auf der Datensatzebene beschreiben jede gelieferte Datei.
- **Speicherung**
Die aufgenommenen Geodaten werden samt Metadaten in einem strukturierten Format übertragen und indiziert (siehe Datenbankkonzept).
 - **Prozessierung:**
In dem Prozess können mithilfe von definierten Algorithmen Informationen aus den gelieferten Geodaten extrahiert werden. Je nach Datenmaterial kann dies automatisiert oder halbautomatisiert mit manuellen Eingriffen durchgeführt werden.
 - **Abgabe und Visualisierung:**
Die aufgenommenen Geodaten können über einen Katalog abgefragt und in unterschiedlichen Formaten heruntergeladen werden. Die Ergebnisse der Prozessierung können in der Visualisierungssoftware betrachtet und ausgewertet werden.

3.1.2 Datenbankkonzept

Eine wesentliche Herausforderung besteht in der Speicherung und Verarbeitung der erfassten Datenmengen inklusive des kompletten Workflows und der Integration in die Systeme des Infrastrukturmanagements. Aufgrund der großen Datenmengen ist es für Betreiber weiters entscheidend, dass der gesamte Prozess von der Datenakquisition und Verarbeitung bis hin zur Datenhaltung in RISKMON vollständig geklärt wird.

Um einen schnellen, performanten und gesicherten Zugriff auf die Geodaten zu gewährleisten, wird eine separate Speicherung von GeoDaten und Metadaten empfohlen.

In einer Speicherstruktur (Metadaten) werden die beschreibenden Metadaten vorgehalten und in einer zweiten Speicherstruktur die gelieferten Daten, weiters werden die eingegebenen Metadaten auf alle drei Ebenen als XML-Datei (Geodaten) vorgehalten. Durch die getrennte Speicherung wird eine Verteilung der Daten auf unterschiedlichen physischen Servern sichergestellt und die Skalierung der Systeme gewährleistet.

Für die Recherche und Abgabe der Geodaten werden die ISO Metadaten in einem Katalog Server (CSW) publiziert.

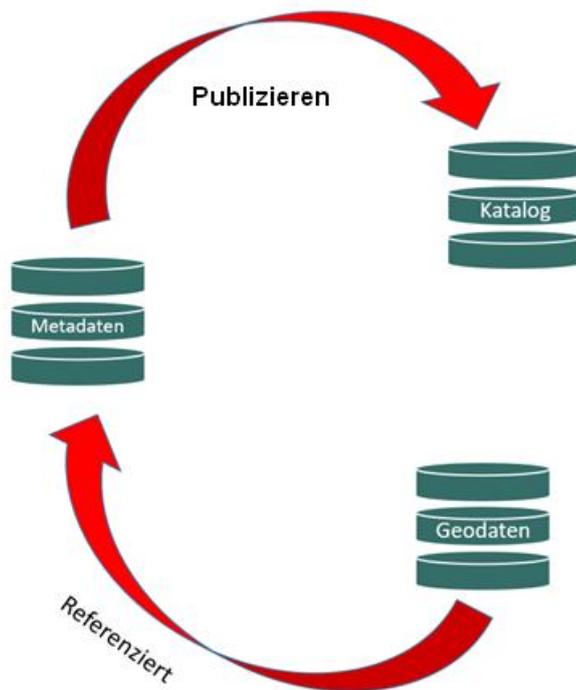


Abbildung 16: Datenbankkonzept

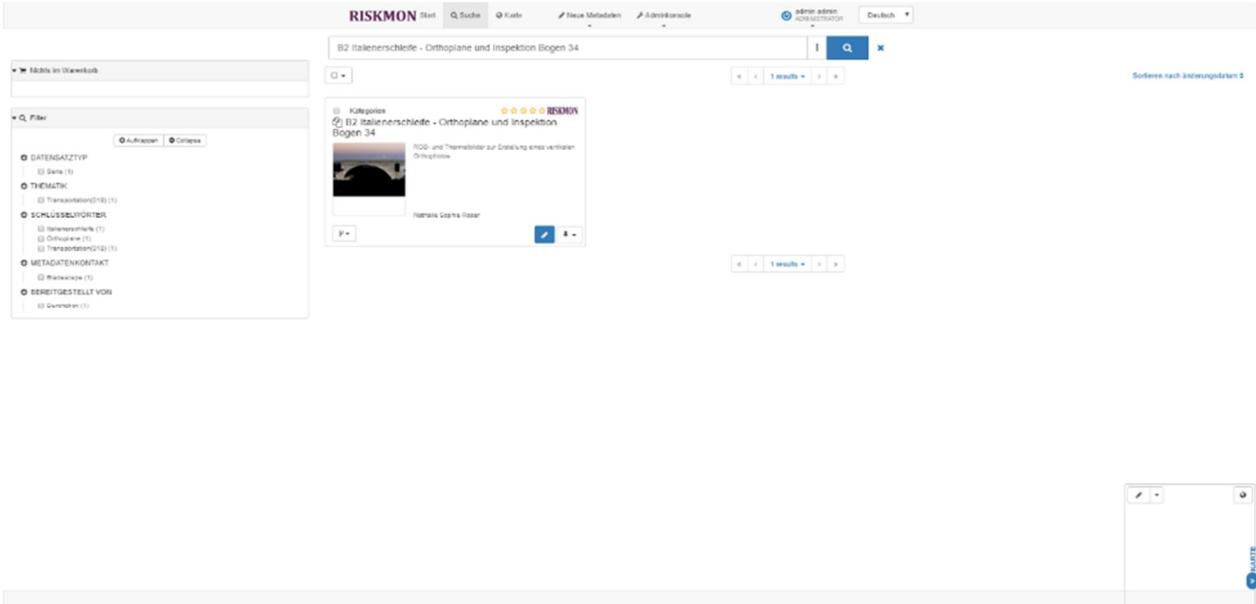


Abbildung 17: Übersicht Suchergebnis (Lieferung: B2 Italienschleife – Bogen 34)

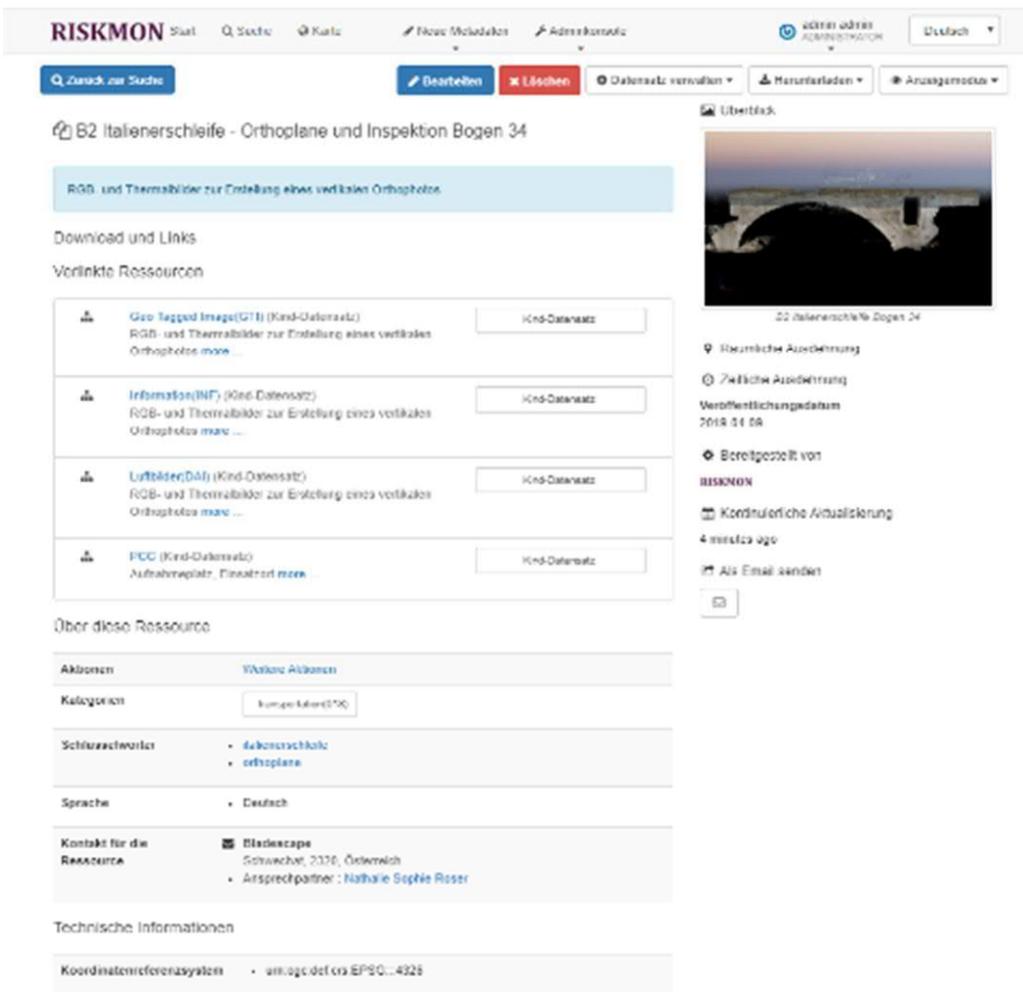


Abbildung 18: Metadatenmanagement Lieferungsübersicht (Lieferung: B2 Italienschleife - Orthoplane und Inspektion Bogen Nr. 34)

The screenshot shows the RISKMON web application interface. At the top, there is a navigation bar with the RISKMON logo, search, map, metadata, and admin console options. A cookie consent banner is visible below the navigation bar. The main content area displays a Geo Tagged Image (GTI) resource titled "Geo Tagged Image(GTI)". Below the title, there is a description: "RGB- und Thermalbilder zur Erstellung eines vertikalen Orthophotos". A list of "Verlinkte Ressourcen" (Linked Resources) is shown, containing several DSC image files (DSC01090.jpg to DSC01096.jpg) with "Kind-Datensatz" (Child Dataset) buttons. On the right side, there are metadata details including "Raumliche Ausdehnung" (Spatial Extent), "Zeitliche Ausdehnung" (Temporal Extent), "Veröffentlichungsdatum" (Publication Date: 2019-04-09), "Bereitgestellt von RISKMON" (Provided by RISKMON), "Kontinuierliche Aktualisierung" (Continuous Update: 3 hours ago), and "Als Email senden" (Send as Email).

Abbildung 19: GTI-Unterverzeichnis (Lieferung: B2 Italienschleife - Orthoplane & Inspektion Bogen Nr. 34)

The screenshot shows the detailed meta-information for a GTI resource. It features a list of "Verlinkte Ressourcen" (Linked Resources) including DSC01189.jpg, DSC01190.jpg, and a parent dataset "B2 Italienschleife - Orthoplane und Inspektion Bogen 34 (Eltern-Datensatz)". Below this, the "Über diese Ressource" (About this Resource) section provides details: "Aktionen" (Actions) with a "Weitere Aktionen" (More Actions) link; "Kategorien" (Categories) including "Interpretation(018)"; "GEMET - Concepts, version 2.1" with a "Geo Tagged Image" link; "Sprache" (Language) set to "Deutsch"; and "Kontakt für die Ressource" (Contact for the Resource) with "Bladescape" (Schwechat, 2320, Österreich) and "Ansprechpartner: Nathalie Sophie Roser". The "Technische Informationen" (Technical Information) section lists "Auflösung" (Resolution) as "0.005 m" and "Koordinatenreferenzsystem" (Coordinate Reference System) as "urn:ogc:def:crs:EPSG::4326". At the bottom, there is a link to "Metadaten herunterladen" (Download Metadata).

Abbildung 20: GTI Meta-Informationen (Lieferung: B2 Italienschleife - Orthoplane und Inspektion Bogen Nr. 34)

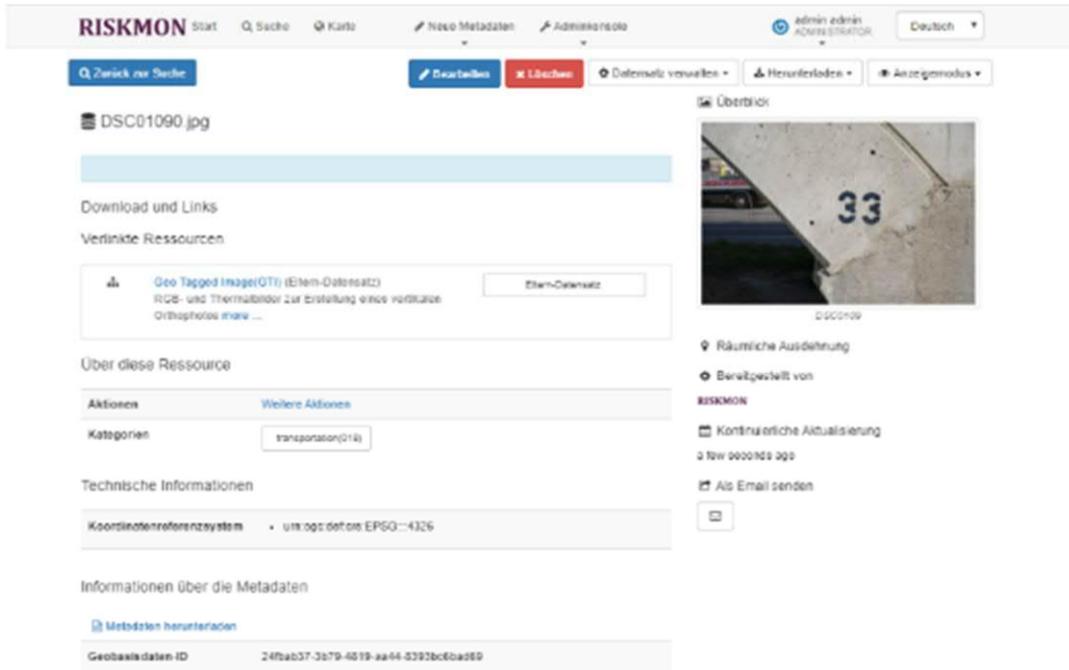


Abbildung 21: Ansicht Eingabe bzw. Erfassungsdaten (Bild: DSC01090.jpg)

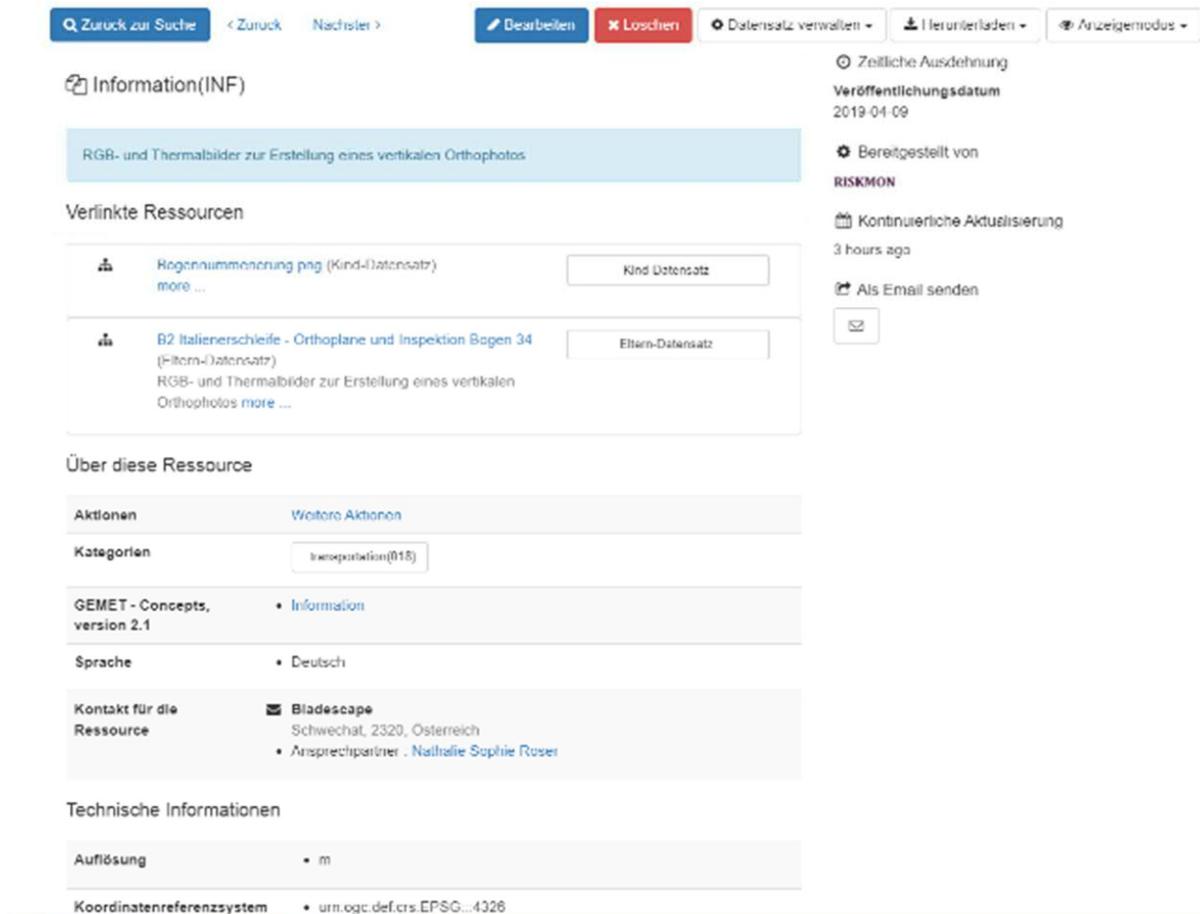


Abbildung 22: INF-Unterverzeichnis (Lieferung: B2 Italienschleife - Orthoplane Inspektion Bogen 34)

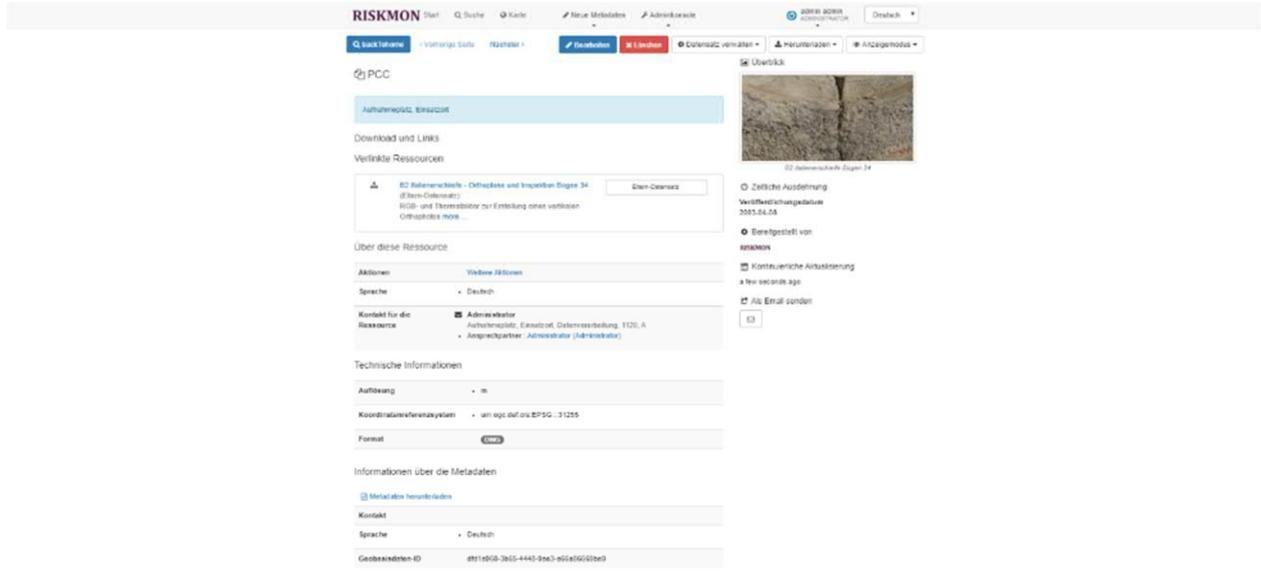


Abbildung 23: PCC Unterverzeichnis (Lieferung: B2 Italienschleife - Orthoplane Inspektion Bogen 34)

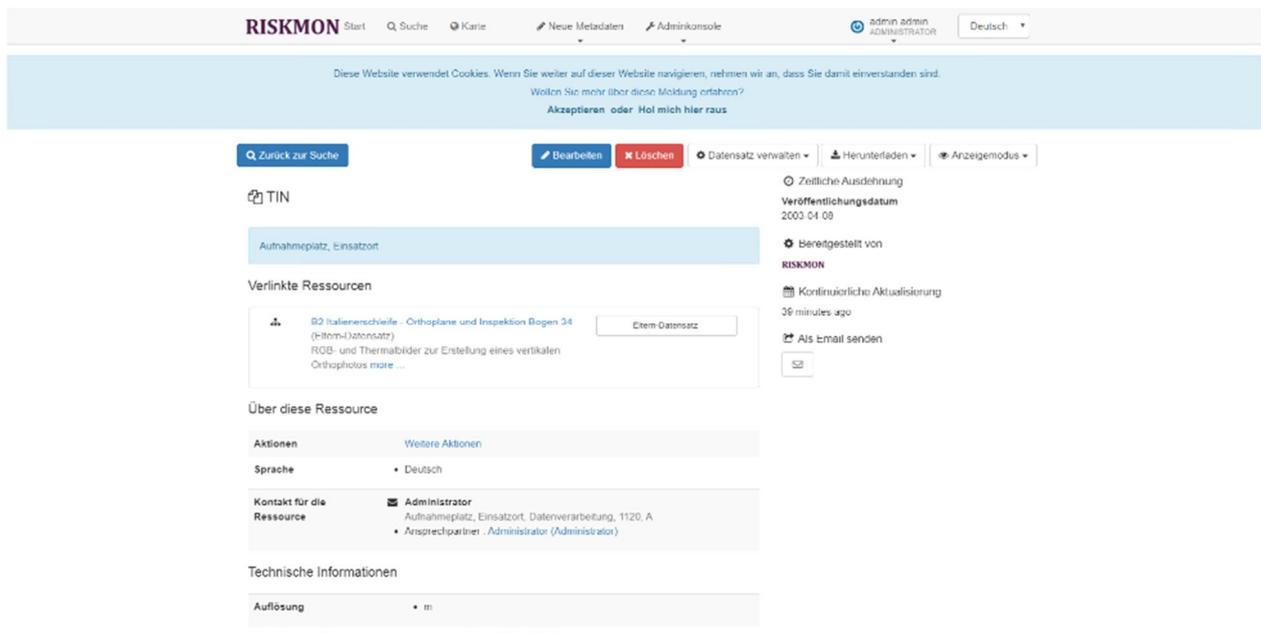


Abbildung 24: TIN Unterverzeichnis (Lieferung: B2 Italienschleife - Orthoplane Inspektion Bogen 34)

3.2 Sensoren und Datenformate

3.2.1 Sensoren

Mit steigendem Interesse an UAV im Bereich der Vermessung und Inspektion steigt auch das Angebot an Sensoren, die verwendet werden können. Neben den angepassten Varianten der Sensorik aus der klassischen bemannten Erfassung werden auch speziell für UAV entwickelte Sensoren angeboten. Dabei ist zu beachten, dass einzelne Produkte nicht für die professionelle Anwendung ausgelegt wurden bzw. überprüft werden muss, ob dieses für die Anforderung passend ist. Generell kann man zwischen bildbasierten Sensoren und Scannern unterscheiden. Zusätzlich werden weitere Sensoren für den professionellen UAV-Einsatz benötigt. Darunter fallen z.B. GPS, IMU oder Abstandssensoren.

In diesem Abschnitt sollen jene Sensoren beschrieben werden, die im Rahmen des Projektes zum Einsatz kommen. Dabei liegt der Fokus auf den Voraussetzungen, die das entsprechende Sensorsystem für den Einsatz in der Zustandserfassung im Infrastruktursektor erfüllen sollte.

Kamera: Für die meisten Einsätze wird eine Kamera auf dem UAV benötigt. Manchmal wird diese nur für zusätzliche Perspektiven, zur Orientierung oder Live-Begutachtung benötigt. Für den professionellen Einsatz und nachhergehende Prozessierung der Daten sollten jedoch einige Voraussetzungen erfüllt sein. Nachfolgend eine Übersicht über entsprechende Voraussetzungen:

- Sensorauflösung: mindestens 36 Megapixel
- Objektivbrennweite: zwischen 28 und 85 mm
- Wechselbares Objektiv
- Einstellbare Kameraparameter wie z.B.: Fokus, Belichtung etc.
- Konstanter Fokus während eines Fluges
- Aufnahme von unkomprimierten Bildern im RAW Format
- Bildstabilisierung (jedoch nur zum Teil sinnvoll)
- Hohe Aufnahmefrequenz
- (Vollformat)Spiegelreflex oder Systemkamera

Die meisten Kamerahersteller bieten eine Kamera an, welche die oben genannten Voraussetzungen erfüllt. Dadurch kann auf eine breite Auswahl von Herstellern wie Canon, Nikon, Sony etc. zurückgegriffen werden.

Laserscanner/Lidar: Die Voraussetzungen für Laserscanner, die auf UAV eingesetzt werden können, sind stark vom Einsatzgebiet und der benötigten Qualität abhängig. Einige namhafte Hersteller aus dem Vermessungsbereich, aber auch spezialisierte Unternehmen stellen entsprechende Hardware her. Im Rahmen der Teststellungen wird der Einsatz von mobilen Laserscannern im Infrastruktursektor geprüft und entsprechende Voraussetzungen definiert.

Sonstige Sensorik: Neben den oben genannten Sensoren zur Zustandserfassung werden auch Thermal- und Multispektralkameras, sowie Gassensoren getestet. Die Labortests sowie Recherchen in Kap. 4.2 Sensorbeschreibung geben eine Übersicht der verfügbaren Sensoren sowie deren Einsatzmöglichkeiten. Welche Sensoren für die Zustandserfassung bzw. die Erkennung welcher Schadensarten geeignet ist, wird in Kap. 4.5 Ergebnisse und Empfehlungen behandelt.

3.2.2 Datenformate

Aufgabe in RISKMON ist die Definition des Datenformates und die Form der Ergebnisübergabe an ASFINAG bzw. ÖBB. In der Geoinformatik existieren viele unterschiedliche Datenformate für die Speicherung der Geometrien, Bildaufnahmen und LiDAR GeoDaten.

Für die Speicherung der Geometrien ist das ESRI-Shape das weitverbreitetste Dateiformat und wird von vielen Kommerziellen- und auch von Openourcesoftware unterstützt. Die Geometrien können auch in einfachen CSV-Dateien gespeichert werden. Da die CSV Dateien einfache Textdateien sind, sind sie aber auch sehr anfällig für Datenfehler. Zu Beispiel durch fehlerhafte Kopien.

Ein weiteres Dateiformat ist das DXF.

Tabelle 32: Datenformate #1 - Geometriedaten

Datenformate	Entwickler	Format	Unterstützung durch Werkzeuge
Shapefile (.shp)	ESRI	Binär	Hoch
Drawing Interchange Format (DXF)	Autodesk	Binär	Niedrig
Textdateien (CSV)	Unabhängig	ASCII	Hoch

Das Dateiformat LAS bzw. LAZ hat sich in den letzten Jahren zu einem quasi Standard für die Speicherung der LiDAR-Daten etabliert. Das Format ist ein öffentliches Standarddateiformat und wird von den meisten Software-Tools unterstützt. Das LAS-Format ist im Gegensatz zum XYZ-Dateiformat, das auch weitverbreitet ist, ein binäres Format und ist dadurch komprimierter. Weiters erlaubt das Format die Speicherung von Zusatzattributen zu den einzelnen Punkten in der Punktwolke, so ist es unter anderem möglich die Klassifizierung, die Intensität und Farben zu speichern. Das LAS-Format erlaubt auch die Speicherung von full waveform LiDAR Aufnahmen.

Tabelle 33: Datenformate #2 - Laserscandaten

Datenformate	Entwickler	Format	Unterstützung durch Werkzeuge
LAS	ASPRS	Binär	Hoch
LAZ	ASPRS	Binär komprimiert	Hoch
XYZ	Unabhängig	ASCII	Hoch

Für die Bildaufnahmen (Rasterdaten) empfehlen wir die Verwendung des GeoTIFF Dateiformats. Das Format hat sich zu einem Standard entwickelt und wird von allen gängigen Softwareprogrammen unterstützt. Im Gegensatz zu einem TIFF mit TFW oder JPEG mit TFW File werden die Information zur geographischen Lage in einem GeoTIFF in den einzelnen Zellen gespeichert. Was die Menge an gelieferten Daten um die Hälfte reduziert.

Tabelle 34: Datenformate #3 - Rasterdaten

Datenformate	Entwickler	Format	Unterstützung durch Werkzeuge
Geo Tagged Image File Format (Geo-TIFF)	Intergraph	Binär	Hoch
JPEG File Interchange Format (JPG)	Joint Photographic Experts Group	Binär	Hoch

Typische Videoformate (480p bis 4K) und Dateigröße	
2.7K 4:3 (2.704x2.028)	4K 16:9 (3.840x2.160)
1440p 4:3 (1.920x1.440)	2.7K 16:9 (2.704x1.520)
960p 4:3 (1.280x960)	1080p 16:9 (1.920x1.080)
720p 16:9 (1.280x720)	
480p 16:9 (848x480)	

Bez.	Symbol	Menge
Byte	B	$2^0=1$
Kbyte	KB	$2^{10}=1,024$
Megabyte	MB	$2^{20}=1,05*10^6$
Gigabyte	GB	$2^{30}=1,07*10^9$
Terabyte	TB	$2^{40}=1,10*10^{12}$
Petabyte	PB	$2^{50}=1,13*10^{15}$
Exabyte	EB	$2^{60}=1,15*10^{18}$
Zettabyte	ZB	$2^{70}=1,18*10^{21}$
Yottabyte	YB	$2^{80}=1,21*10^{24}$

Datenmenge:

$$D = B \cdot H \cdot f_v \cdot A \cdot t$$

- B... Breite in Pixel
- H... Höhe in Pixel
- f_v ... Frequenz in Hz
- A... Farbtiefe in Bit
- t... Dauer in Sekunden

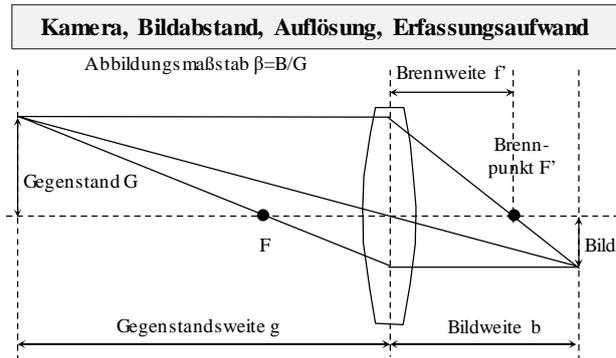
720p (24Hz, 1min, 8-bit : 3byte)

Frame = $(1.280 \cdot 720 \cdot 3) / 2^{20} = 2,63MB$ (unkomprimiert)

⊗ Foto-JPEG : 0,62MB (komprimiert)

Video = $(1.280 \cdot 720 \cdot 3 \cdot 24 \cdot 60) / 2^{30} = 3,71GB$ (unkomprimiert)

⊗ H.264 : 0,35GB; MPEG2 : 0,027GB (komprimiert)



Bildgröße (durch Sensor vorgegeben):

$$B = G \cdot f' / (g - f') \quad \text{⊗} \quad G = B (g / f' - 1) \quad \text{⊗}$$

$$f' = g / (G / B + 1) \quad \text{⊗} \quad g = f' (G / B + 1)$$

z.B. Vollformat $6\mu\text{m}$ (24x36 mm)

$$(24/0,006) \times (36/0,006) = 4.000 \times 6.000 \text{ Pixel} = 24 \text{ MP (Megapixel)}$$

z.B. Rissbreite 1mm, 24 MP Kamera, Brennweite $f'=20 \text{ mm}$:

1 Pixel $\sim 1\text{mm}$ \rightarrow Bildgröße max. 4.000 x 6.000 mm

$$g = f' (G / B + 1) = 20 (4000 / 24 + 1) = 3.353\text{mm} = 3,3\text{m}$$

z.B. Rissbreite 0,2 mm, 24 MP Kamera, 5 m Abstand:

1 Pixel $\sim 0,2 \text{ mm}$ \rightarrow Bildgröße max. 800 x 1.200mm

$$f' = g / (G / B + 1) = 5000 / (800 / 24 + 1) = 145\text{mm}$$

Abbildung 25: Typische Videoformate, Datenformate und Dateigrößen sowie Darstellung des Zusammenhangs von Bildabstand, Auflösung und Erfassungsaufwand als Basis der Photogrammetrie

3.3 Erfassung und Prozessierung

3.3.1 Erfassung

Die Auswahl der richtigen und optimalen Hardware-Software-Kombination im Rahmen der Einsatzplanung ist ein kritischer Erfolgsfaktor bei der Erfassung mittels UAS. Im Zuge der Analyse der Anforderungen muss einerseits entschieden werden, welcher Sensor bzw. welche Sensor-kombination aus vernetzten Einzelsensoren auf der Flugplattform integriert werden soll, aber auch die entsprechende UAV-Bauart (Flächen-, VTOL, Hybrid) sollte sorgfältig gewählt werden. Je nach Anforderung der zu detektierenden Eigenschaften, gewünschter Genauigkeit, topographischer Gegebenheiten und einzusetzender Auswertemethode werden entsprechende Konstellationen und Setups gewählt. Nachfolgend werden Details zur Flugplanung und der unterschiedlichen Erfassungsmethoden, die im Forschungsprojekt eingesetzt werden, beschrieben.

Flugplanung:

Anhand der Anforderungen, die seitens des Auftraggebers kommuniziert werden, wird in der Vorbereitung eine entsprechende Flugplanung konzipiert. Bei den Anforderungen kann es sich um eine geforderte Auflösung bzw. Genauigkeit oder zu erfassende Eigenschaften handeln. Während im Falle einer photogrammetrischen Erfassung (für Details siehe Absatz „Photogrammetrische Erfassung“) bspw. auf die Einhaltung der notwendigen Überlappung (z.B.: 80% Längs- und 60% Querüberlappung) der Bilder zu achten ist, müssen beim Laserscanning (für Details siehe Absatz „Laserscanning“) u.a. die erforderliche Punktdichte und andere LIDAR-spezifische Parameter erreicht werden. Je nach der Auflösung, Überlappung oder Punktdichte, die für die Erfüllung der Anforderungen notwendig ist, sollten zumindest folgende Flugeinsatzparameter bei einer photogrammetrischen Erfassung geplant und berücksichtigt werden:

- Flughöhe (zB in m AGL) bzw. Entfernung zum Objekt
- Ausrichtung der Kamera (nadir, schräg, horizontal)
- Fluggeschwindigkeit (m/sek.)
- Auslösefrequenz
- Überlappungsgrade
- verschiedene, optimierte Sensor- und

Im Falle einer Erfassung per Laserscanning/LIDAR müssen neben den Flugparametern auch die korrekte Einstellung des Scanners sowie der RGB-Kameras (Einfärbung der Punktwolke) berücksichtigt werden, um Genauigkeit (Accuracy/Precision) und Punktdichte erreichen zu können. Für die Definition der Flugparameter sind neben den Anforderungen der Auftraggeber auch noch die möglichst präzisen topographischen Gegebenheiten im Einsatzbereich sowie auch die Leistungsdaten der eingesetzten Flugplattform (UAV) und der gewählten Sensorik genau zu kennen. Je nach notwendiger Nutzlast, Ausdehnung des Interessensgebietes, Witterungsverhältnissen und benötigter Navigationssensoren (Abstandssensoren, RTK-fähige GNSS Antenne etc.) wird ein passendes UAS ausgewählt. Im Falle eines RGB-Kamera Einsatzes, müssen Sensorauflösung und Pixelgröße des Sensors, sowie die Brennweite des Objektivs gut gewählt sein, um eine verlässliche Flugplanung durchführen zu können.

Im Unterschied zur Bodenauflösung, welche die Größe eines Pixels der resultierenden Bilder auf Geländeneiveau beschreibt, ist die absolute Genauigkeit die potenzielle Abweichung der wahren Lage eines Objektes in der wirklichen Welt, also einem definierten Koordinatensystem. Maßgebliche Einflussgröße dieser Genauigkeit ist die Positionierungsgenauigkeit der Drohne, wobei standardmäßig eine Form der GNSS Positionierung zum Einsatz kommt. Je nach verwendetem

Sensor bzw. Positionierungsverfahrens werden z.B. im Falle einer GNSS Einfachlösung Genauigkeiten im Dezimeterbereich erreicht, während das RTK-Verfahren Genauigkeiten im Bereich weniger Zentimeter ermöglicht. Zusätzlich zur Positionierung mittels RTK an Board können bei Bedarf Passpunkte eingemessen werden, um die Genauigkeit zu verbessern bzw. zu prüfen. In der Prozessierung kommt diesen Punkten in weiterer Folge eine entsprechende Bedeutung zu.

Ein weiterer Punkt, der im Rahmen der Flugvorbereitung zu beachten ist, ist die rechtliche Situation. Neben der Berechtigung des Piloten den Flug mit den entsprechenden, zertifizierten Luftfahrzeugen sowie innerhalb der erlaubten Flughöhe durchzuführen, braucht es anlassbezogen weitere Genehmigungen, welche in Österreich primär von der Austro Control ausgestellt werden. Folgende Zonen wären zu beachten, wenn ein Flug in der Nähe geplant wird:

- Flugverbotszonen (No-drone zone)
- Kontrollzonen
- Flugbeschränkungsgebiete
- Militärischer Luftraum
- Gefahrengebiete
- Flugplätze und militärische Flugplätze

Generell ist bei geplanten Einsätzen in der Nähe von Straßen, Autobahnen, Flughäfen, Naturschutzgebieten und Menschenansammlungen eine spezielle Prüfung notwendig.

Zusätzlich muss der Einsatz mit dem Grundstückseigentümer bzw. Verfügungsberechtigten abgesprochen sein, da eine Durchführung nur mit entsprechender Zustimmung erfolgen darf.

Die Flugplanung ist in Kombination mit einer spezifischen Gerätekonstellation für die erreichbare und wiederholbare Qualität der Erfassungsdaten der maßgebliche Erfolgsfaktor. Fehler die bei der Datenerfassung gemacht werden, können zu einem späteren Zeitpunkt bspw. in der Datenprozessierung oder Datenanalyse nicht mehr wettgemacht werden. Umgekehrt können die Erfassungsdaten auch noch in vielen Jahren mit neuen Instrumenten neu verarbeitet werden.

Für das je Anwendung optimierte Gerätesetting und die zweckspezifische Flugplanung sind nach der von BLADESCAPE entwickelten Methode, unter anderem folgende wesentliche zusätzlichen Einflussfaktoren und vorbereitende Aufgaben zu berücksichtigen:

- Benötigte (Positions)Genauigkeit (Accuracy / Precision)
- Möglichkeit, mehrere untereinander vernetzte, gleichzeitig agierende Sensoren einzusetzen
- Besondere Berücksichtigung unterschiedlich optimaler Einstellwinkel dieser Sensoren
- Welche Vorgaben bzw. Einschränkungen seitens Sensoren an Umfeldbedingungen (Lichtverhältnisse, Windgeschwindigkeit, Verwirbelungen, Temperatur etc.) zu beachten sind
- Inwieweit Sense & Avoid-Lösungen in das eingesetzte System zu integrieren sind
- Simulation und iterative Annäherung (z.B. im CAD-Programm), wie sich unterschiedliche Einstellungen (Winkel, Brennweiten etc.) auf die Bodenauflösung und somit Qualität der Ergebnisse auswirken – daraus resultiert eine optimale Flugentfernung zu Teilobjekten des zu erfassenden Areals.
- Ermittlung der optimalen Flugentfernung zu Teilobjekten des zu erfassenden Areals: Errechnet auf Basis der Iterationen sowie verfügbarer bzw. selbst erstellter DGM/DOM
- Mit welcher Positionsgenauigkeit sich daraus abgeleitet die Daten erfassen lassen
- Berücksichtigung von Anforderungen an Datentransfer bzw. Live-Bildübertragung
- Genehmigungstechnische Einschränkungen

Photogrammetrische Erfassung

Im Falle der photogrammetrischen Erfassung (oder Image Matching) wird die reflektierte oder vom Objekt selbst ausgesendete Strahlung erfasst und in einem Rasterdatenformat abgespeichert. Im Normalfall handelt es sich um eine Kamera, die Bilder im optischen Bereich aufnimmt. Neben dem optischen Wellenlängenbereich, kann z.B. auch der Infrarotbereich genutzt werden. Durch die Erfassung unterschiedlicher Wellenlängen, kann unterschiedliche Information über das beobachtete Objekt bestimmt werden (z.B.: Temperatur, Feuchte etc.). Die Bilder werden überlappend aufgenommen, was bedeutet, dass Teile des Bildes auch auf der nachfolgenden Aufnahme zu sehen sind. Voraussetzung für eine fotogrammetrische Erfassung ist die entsprechende Überlappung, sowie die bekannte Position und Raumrichtung des Aufnahmezentrums zum Zeitpunkt der Aufnahme um die Bildpunkte räumlich zu referenzieren. Mithilfe der oben genannten Voraussetzungen kann mithilfe mehrerer Schritte, die standardisiert in diversen Programmen mittels Algorithmen automatisiert sind, die Lage von Objekten im Raum bestimmt werden. In weiterer Folge können dank dieser räumlichen Information Punktwolken oder durch die dadurch ermöglichte Entzerrung, Orthofotos erstellt werden.

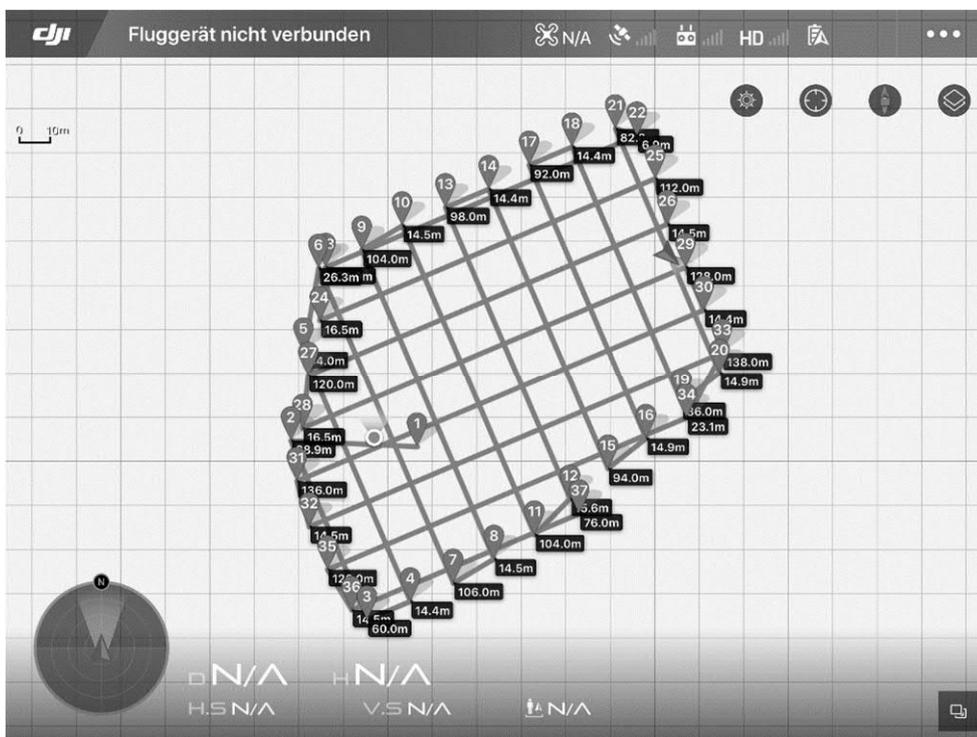


Abbildung 27: Beispiel Flugplanung einer fotogrammetrischen Erfassung

Der Einsatz der photogrammetrischen Erfassungsmethode bietet den Vorteil, dass interpretierbare Information (z.B.: RGB-Farben, multispektrale Information) zusätzlich zu den geometrischen Ausmaßen der zu erfassenden Objekte aufgenommen werden. Dadurch können z.B. Auffälligkeiten auf Oberflächen visuell interpretiert werden, was bei Inspektionsaufgaben unabdingbar ist. Je nach Flugplanung und Oberflächenstruktur können sehr hohe Punktdichten (z.B. 0,2 mm Auslösung = 5000 x 5000 Bildpunkte = 25 MP/m²) erreicht werden und dabei ist die Anschaffung der entsprechenden Ausstattung günstiger im Vergleich zum Airborne Laserscanning mit typischerweise niedrigerer Auslösung (300 – 2000 Bildpunkte/m²). Durch eine geringere Lagegenauigkeit der mit Fotogrammetrie bestimmten Punkte und einer weniger präzisen Definition von Flächen ergeben sich besonders bei der Erfassung der Geometrie von Objekten bzw. bei Vegetation Nachteile gegenüber von Laserscans, die durch Kombination der Verfahren behebbar sind.

Laserscanning

Bei der Erfassung mittels Laserscanning handelt es sich um ein aktives Verfahren. Bei einer der gängigsten Bauformen für Laserscanner wird der Laserstrahl im Scanner produziert und in Impulsen auf einen rotierenden Spiegel gelenkt. Der Strahl verlässt den Scanner in einem gewissen Winkel, wird an einer Oberfläche im Zielraum reflektiert und beim Wiedereintritt im Scanner registriert. Durch die gemessene Laufzeit bzw. Phaseninformation des registrierten Laserstrahls kann die Distanz zum erfassten Objekt genau bestimmt werden. Unter der Voraussetzung einer bekannten Position des Scanners, der Lage im Raum und der Ausrichtung des Spiegels können diverse Punkte räumlich bestimmt werden. Die Genauigkeit der Methode hängt stark von der Bestimmung der Position und der Lage des Scanners ab, weshalb möglichst präzise Methoden zur Positionierung und der Einsatz einer hochgenauen Inertialen Messeinheit (IMU – Lage im Raum durch Beschleunigungssensoren) eingesetzt werden muss, daher auch die Material- bzw. Gerätekosten entsprechend höher einzuschätzen sind. Eine Überlappung der einzelnen Flugstreifen ist im Falle des Laserscannings nicht für das eigentliche Verfahren notwendig, führt allerdings zu einer höheren Genauigkeit bzw. Kontrollierbarkeit, einer höheren Punktdichte in den überlappenden Bereichen und einer verbesserten Vermeidung von Abschattungen.

Die Punktwolken, die durch Laserscanning erfasst wurden, weisen je nach Auslösefrequenz, Spiegelrotation, Flughöhe etc. eine im Vergleich zur Fotogrammetrie niedrigere Punktdichte auf (typischerweise 300 – 2000 Punkte/m²). Die durch die direkte Messung erhöhte Genauigkeit erlaubt dagegen die sehr präzise Bestimmung der geometrischen Formen in Position, Ausdehnung und Lage. Im Gegensatz zu optischen passiven Verfahren können Laserstrahlen zum Teil Vegetationsschichten durchdringen, wodurch eine Erfassung von bedeckten Objekten möglich ist. In Kombination mit optischen Bilddaten bzw. entsprechenden Klassifizierungsalgorithmen können Punktwolken eingefärbt bzw. berechnete Modelle durch Farbinformation erweitert werden.

Weitere Erfassungsmethoden

Neben oben genannten klassischen luftgestützten Erfassungsmethoden gibt es unter anderem auch den Einsatz von Radar- oder Gassensoren. Die Erfassungsmethoden dieser Sensoren ähnelt stark jener von Image Matching und wird oft auch mit demselben Flugplan erfasst. Der entscheidende Unterschied ist der Wellenlängenbereich, für den der entsprechende Sensor sensibel ist und welche Eigenschaften damit erfasst werden können.

Neben dem klassischen Image Matching können auch andere Produkte aus optischen Bilddaten entstehen, wodurch keinerlei Überlappung benötigt wird. Dabei können Bilddaten mit anderen räumlichen Daten z.B. Plänen, Vektordaten, Punktwolken oder Modellen kombiniert werden. Die zusätzlichen Daten dienen zur räumlichen Orientierung, während die Bildpositionen bzw. -abdeckung referenziert dargestellt werden. Dadurch können hochauflösende Bilder strukturiert und je nach Interessensgebiet zugänglich gemacht werden. Dieselbe Funktionalität kann auch im Falle von Videoaufnahmen erreicht werden. Vorteil dabei ist die einfachere Erfassung, die auch in schwierigem Terrain ohne sicherheitsbedingte Einschränkungen möglich ist bzw. die Auswertung von Objekten beliebiger Größe ermöglicht.

Die im Forschungsprojekt geplanten Teststellungen im Bereich der Lawinenerfassung machen eine Ergänzung durch alternative Erfassungsmethoden sinnvoll. Diese werden im Rahmen der Vorbereitung vom Projektteam entwickelt. Das Abwerfen von Sensoren und Auslesen der erfassten Daten, sowie das Einsetzen von Sonden von einer UAS-Plattform sind einige Beispiele für potentielle Methoden (vgl. Kap. 6.6 Konzept Sensornetzwerk).

3.3.2 Prozessierung

Die mittels Sensoren auf UAV oder stationär erfassten Daten sind entsprechend zu relativ zueinander und absolut in ihrer Lage zu referenzieren und zu verarbeiten. Für diese Verarbeitung stehen eine Reihe von Softwaretools zur Verfügung, die über entsprechende Referenzierung der Aufnahmen eine dreidimensionale Rekonstruktion des Erfassungsgebietes aus Bilddaten (Fotogrammetrie) und Laserscans erlauben. Handelsübliche Softwaretools wie Pix4D, Fotoscan und Realitycapture sind auf dieser Rekonstruktion spezialisiert (standalone), während andere Tools wie ContextCapture, RECAP oder Drone2Map zwar vergleichbare Funktionalitäten aufweisen, aber Teil einer größeren Produktfamilie sind (Tabelle 35). Die einzelnen Produkte unterscheiden sich dementsprechend in Funktionsumfang, Prozessierungsgeschwindigkeit, Genauigkeit und Preis, weisen jedoch entsprechende Schnittstellen zu Standardformaten für den Export (Jpeg, Geotiff, OBJ, XYZ, LAS, DXF, SHP; PDF, KML) auf. Weitere typische Funktionalitäten dieser Software-Tools bzw. in der Weiterverarbeitung der Daten sind:

- Transformation der Geodaten von einem Koordinatensystem in ein anderes
- Daten aus verschiedenen Quellen (Datenbanken, Files) importieren
- Mosaik aus dem einzelnen GeoTiffs erstellen
- Überlagerung und Referenzierung unterschiedlicher Datenquellen
- TIN's aus den Punktwolken erstellen
- Ausschnitte aus der Punktwolke bzw. Rasterdaten extrahieren (Clipping)
- Erstellen von Meshs ohne/mit Textur und 3D - Objekten
- Messungen und geometrische Operationen auf 3D – Objekten
- Export in geeignete Viewer und online (z.B. nach Sketchfab)

Tabelle 35: Auswahl Softwaretools Fotogrammetrie/LIDAR (3D – Modellierung)

Software	Spezifikationen	Sonstiges/Daten	Eignung
DroneDeploy: 	Homepage: www.dronedeploy.com MobileApp: Ja (Steuerung/Mapping) Berechnung: Cloud (online/realtime) Hardware: Gering (online) Import: Bild, Laserscan, Thermographie mit Referenzierung	Preis: Pro 83 \$/M. limited Business 250 \$/M Enterprise auf Anfrage Ergebnisse: Punktwolke, Mesh, 3D – Objekte, Textur Export: Jpeg, Geotiff, OBJ XYZ, LAS, DXF etc.	Sehr gute Eignung für Kartographie, Erfassung, Messungen und BIM, sowie für große Datenmengen
Pix4D: 	Homepage: www.pix4d.com MobileApp: Ja (Steuerung/Mapping) Berechnung: Cloud (online/realtime) & Desktop offline Hardware: PC (medium/high), GPU Import: Fokus auf Fotogrammetrie (Lidar, Thermo k.A.)	Preis: 4Dmapper 217 \$/M 4Dbim 333 \$/M Perpetual: 3.900 \$ Ergebnisse: Punktwolke, Mesh, 3D – Objekte, Textur Export: Jpeg, Geotiff, OBJ XYZ, LAS, DXF, SHP; PDF, KML etc.	Sehr gute Eignung für Kartographie, Erfassung, Messungen und BIM, Schwerpunkt Drone und Fotogrammetrie
Agisoft Fotoscan: 	Homepage: www.agisoft.com MobileApp: Nein Berechnung: keine Cloudlösung Desktop offline Hardware: PC (medium/high), GPU Import: Bild, Laserscan, Thermographie mit Referenzierung	Preis: Standard 179 \$ Pro 3.499 \$/M perpetual only Ergebnisse: Punktwolke, Mesh, 3D – Objekte, Textur Export: Jpeg, Geotiff, OBJ XYZ, LAS, DXF, SHP; PDF, KML etc..	Sehr gute Eignung für Kartographie, Erfassung, Messungen und BIM, Schwerpunkt Fotogrammetrie

Reality Capture: 	Homepage: www.capturingreality.com MobileApp: Nein Berechnung: keine Cloudlösung Desktop offline, sehr schnell Hardware: PC (medium/high), GPU Import: Bild, Laserscan, Thermographie mit Referenzierung	Preis: CLI 750 \$/M PGM 4.000 \$ Full 15.000 \$ Ergebnisse: Punktwolke, Mesh, 3D – Objekte, Textur Export: Jpeg, Geotiff, OBJ XYZ, LAS, DXF, FBX etc.	Sehr gute Eignung für Kartographie, Erfassung und BIM mit Referenzierung Bild & Lidar, schnell
Bentley ContextCapture: 	Homepage: www.bentley.com MobileApp: Ja (Processing, Marking) Berechnung: Cloud (online/realtime) & Desktop offline Hardware: PC (medium/high), GPU Import: Bild, Laserscan, Thermo Software mit Integration in OpenRail/OpenRoad, BIM	Preis: ContextCapture CC-Center k.A. Ergebnisse: Punktwolke, Mesh, 3D – Objekte, Textur Export: Jpeg, Geotiff, OBJ XYZ, LAS, DXF, SHP; PDF, KML, Bentley Formate etc.	Sehr gute Eignung für Kartographie, Erfassung, Messungen und BIM, Teil umfassender Software Produktfamilie
3DFlow Zephyr: 	Homepage: www.3dflow.net MobileApp: Nein Berechnung: keine Cloudlösung Desktop offline Hardware: PC (medium/high), GPU Import: Bild, Laserscan (Schwerpunkt Fotogrammetrie)	Preis: Free, Lite 149 €, Pro 2.400 €, Aerial 3.900 € Ergebnisse: Punktwolke, Mesh, 3D – Objekte, Textur Export: Jpeg, Geotiff, OBJ XYZ, LAS, DXF, SHP; PDF, KML etc..	Sehr gute Eignung für Kartographie, Erfassung, Messungen und BIM, automatisierte Abläufe
Autodesk Recap: 	Homepage: www.autodesk.com MobileApp: Ja (Processing, Marking) Berechnung: Cloud (online/realtime) (Desktop offline) Hardware: PC (medium/high), GPU Import: Bild, Laserscan, Thermo Software mit Integration in Civil3D, Revit und BIM	Preis: Recap Pro 305 \$/a, Pro +Revit+ACAD 2.755 \$/a Ergebnisse: Punktwolke, Mesh, 3D – Objekte, Textur Export: Jpeg, Geotiff, OBJ XYZ, LAS, DXF, SHP; PDF, KML, Autodesk Formate etc.	Gute Eignung für Kartographie, Erfassung, Messungen und BIM, Teil umfassender Software Produktfamilie mit REVIT
ESRI Drone2Map: 	Homepage: www.esri.com MobileApp: Ja (Survey, Visualisierung) (keine Drohnensteuerung) Berechnung: Cloud (online/realtime) Desktop offline Hardware: PC (medium/high), GPU Import: Bild, Laserscan, Thermo Software mit Integration in ArcGIS und BIM	Preis: Drone2Map 1.500 €/a, Pro +ArcGISpro 1.500 \$/a +500 \$ Maintenance/a Ergebnisse: Punktwolke, Mesh, 3D – Objekte, Textur Export: Jpeg, Geotiff, OBJ XYZ, LAS, DXF, SHP; PDF, KML, Esri-GIS Formate etc.	Gute Eignung für Kartographie, Erfassung, Messungen, Teil umfassender Software Produktfamilie mit ArcGIS

Legende: Auswahl nach Verbreitung und Eignung basierend auf Herstellerangaben/Vergleichstests (Logos sind Eigentum der Firmen)

Wie in Abbildung 28 dargestellt liefern Airborne – Laserscans Punktwolken mit hoher Auflösung und sehr hoher Lagegenauigkeit – die Datenverarbeitung und Bereinigung erfolgt einfach mit Herstellersoftware. Für eine Schadenserkennung an Objekten ist die Punktdichte jedoch meist nicht ausreichend. Für diese Aufgabe werden daher terrestrische Laserscans aus großer Nähe mit hoher Auflösung vor allem für die Zustandserfassung von Gleiskörpern und Straßenoberbau verwendet. Mit entsprechender Spezialsoftware kann dann auch eine automatisierte Auswertung der Schadensmerkmale erfolgen (Abbildung 29). Die Darstellung von Punktwolken bis zu 3D – Objekten in entsprechenden Viewern ist mittlerweile ebenso Standard, wie die Durchführung von einfachen Messungen (Abbildung 31). Die dreidimensionale Modellierung z.B. in Autodesk REVIT gewinnt für die Optimierung in der Bauphase ebenfalls an Bedeutung. Die Erfassung eines Bestandsnetzes mit Auswertung und Verknüpfung zum Asset Management steht dagegen noch weitgehend am Anfang, auch wenn die entsprechenden methodischen Ansätze (HOFFMANN, M 2018) dafür verfügbar sind und sukzessive in die Bestandssysteme integriert werden können.



Abbildung 28: Airborne – Laserscans liefern Punktwolken mit mittlerer Auflösung und sehr hoher Lagegenauigkeit – die Datenverarbeitung und Bereinigung erfolgt mit Herstellersoftware (z.B. RIEGL)

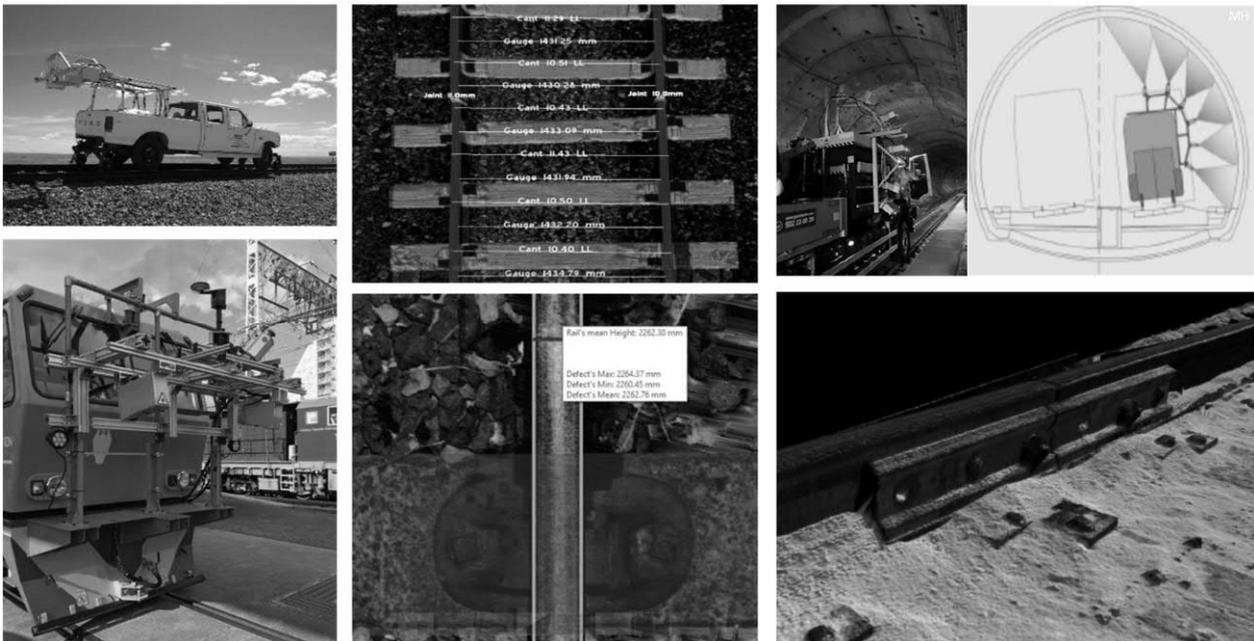


Abbildung 29: Terrestrische Laserscans bei 60 km/h erreichen höhere Auflösungen (1mm quer, 0,1 mm vertikal bei 0,25 mm Standardabweichung) mit automatischer Auswertung (PAVEMETRICS)

Die jeweils erzielbare Auflösung und Genauigkeit hängt maßgeblich vom Einsatzzweck bzw. den eingesetzten Scannern sowie den Aufnahmebedingungen (Abstand, Abtastrate, Geschwindigkeit etc.) ab. Für weiterführende Informationen zu dieser Thematik wird daher ausdrücklich auf die Angaben der jeweiligen Hersteller verwiesen. Inwieweit diese Angaben unter praktischen Einsatzbedingungen auch tatsächlich erreicht werden können, lässt sich nur durch entsprechende Teststellungen und Validierung der Aufnahmen klären.



Einsatz weltweit in einer Vielzahl von Straßenverwaltungen – mit neuen Methoden im PMS in Zukunft noch effizienter einsetzbar

MH

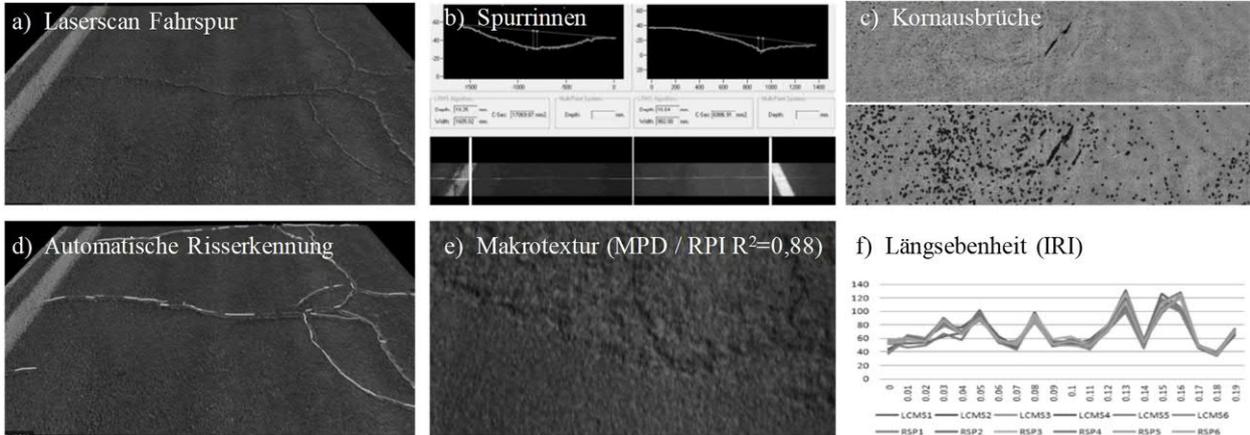


Abbildung 30: Aufnahmen bei 60 km/h mit hohen Auflösungen und automatischer Auswertung der Schadensmerkmale erlauben kostengünstigen Einsatz und häufige Erfassungen (PAVEMETRICS)

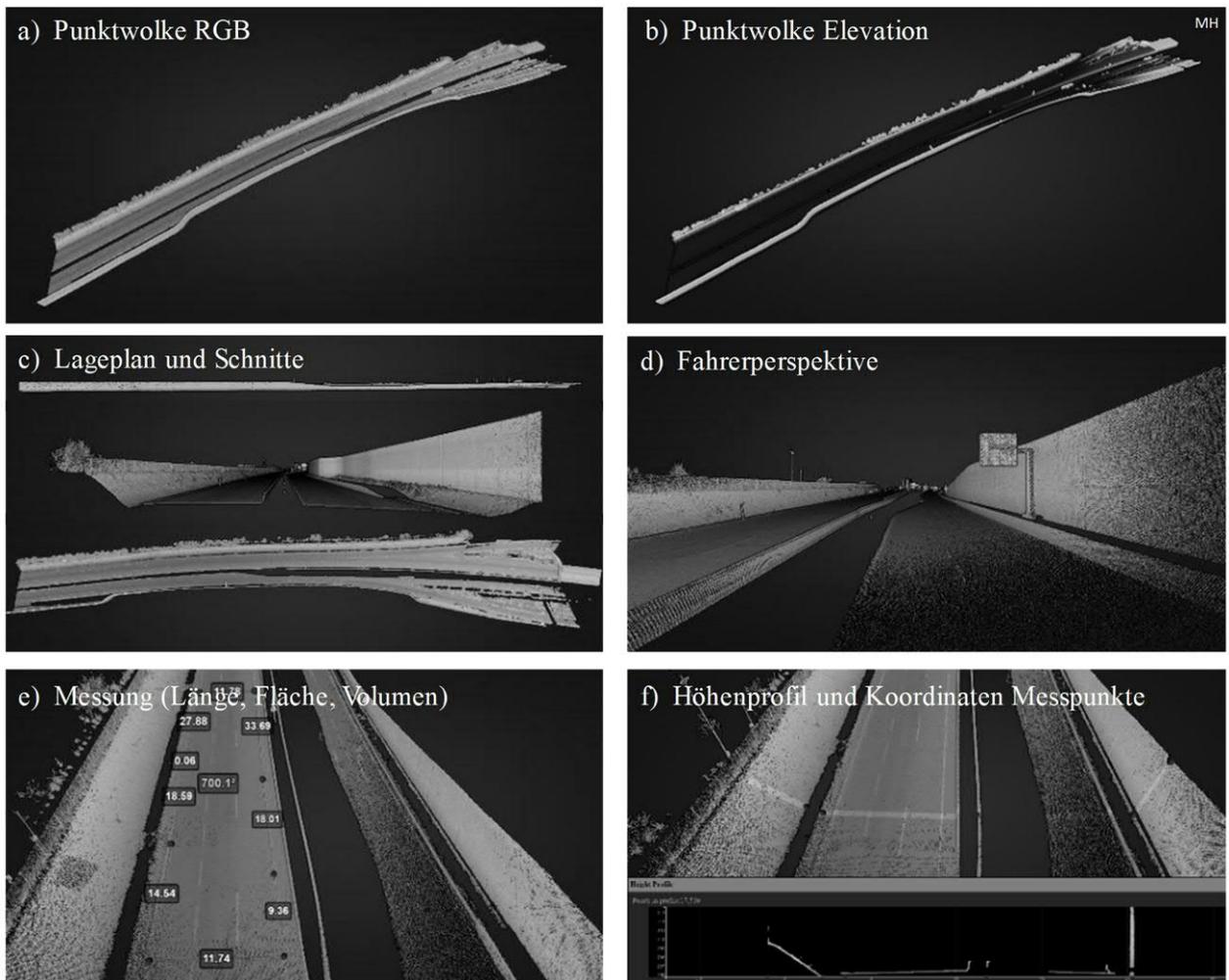


Abbildung 31: Einfache Viewer für Punktwolken mit Zusatzfunktionen wie Höhenlage, Differenz, Ansichten (Lageplan, Schnitte), Messung von Längen, Flächen und Volumen sowie Höhenprofilen und Schichtenlinien gibt es als Freeware mit Source-Code (z.B. www.potree.org)

Verarbeitung fotogrammetrischer Erfassung

Die im Zuge des Projektes durchgeführte Prozessierungen wurden u.a. mit der Software Pix4DMapper, RealityCapture, Agisoft Metashape und 3DF Zephyr durchgeführt. Die nachfolgenden Spezifikationen beschreiben die Ausgangslage, von der bei den unterschiedlichen Use-Cases ausgegangen wird. Spezifische Details, wie das Anpassen wesentlicher Parameter oder die selektive Produktion ausgewählter Ausgaben, sind in den Kapiteln der einzelnen Use-Cases näher beschrieben. Die in der Prozessierung angestrebten Ausgaben sind allgemein die Folgenden:

.las – PCC: Pointclouds stellen die originären Ausgaben von LiDAR-Scans dar. In der Fotogrammetrischen Rekonstruktion können ebenfalls Pointclouds (thin, dense) erzeugt werden. Die Kodierung speichert eine Liste der Koordinaten der einzelnen Punkte, wobei durch ein in den Metadaten definiertes Offset sowie einen Scaling Faktor die Datengröße reduziert wird. Die Daten können dabei in Binärformat (Ressourcenoptimierung) oder in ASCII-Format (direkte Lesbarkeit) gespeichert werden, wobei im Zuge des Projektes - bedingt durch die großen Datenmengen - die binäre Speicherform gewählt wurde.

In Metadaten-Segmenten sind weiterführende Informationen, z.B. über das verwendete Koordinatensystem oder zur Farbkodierung enthalten, wodurch sichergestellt wird, dass eine Positionsbestimmung bei ordnungsgemäßer Verwendung stattfinden kann. Im Kontext von fotogrammetrisch erfassten Eingabedaten sind Laserscans oder Pointclouds aus der Fotogrammetrie in den meisten Fällen die Ausgabe des ersten Schrittes der Prozessierung. Sie werden unter anderem zur Erstellung von 3D-Meshes (ohne/mit Textur) oder für digitale Oberflächenmodelle benötigt.

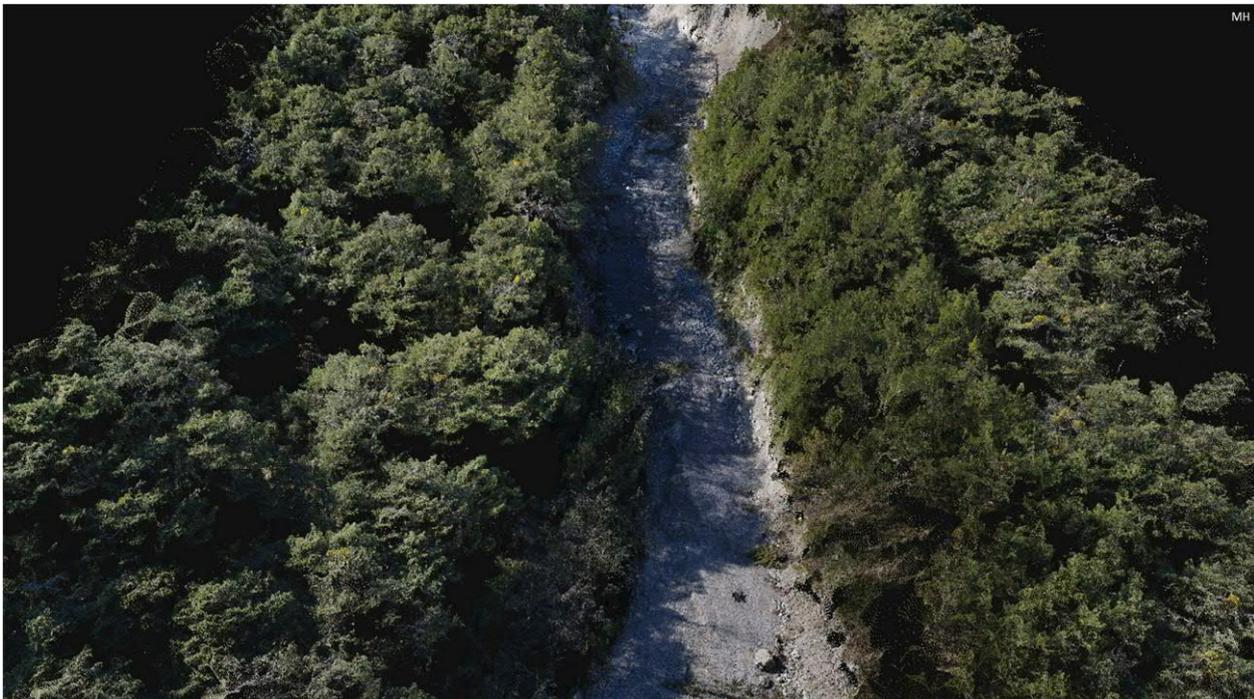


Abbildung 32: N1 Schüttmure - 3D Rekonstruktion Fotogrammetrie (PCC: Dense Pointcloud)

Das .las-Format wurde gegenüber den folgenden, ebenfalls verbreiteten Formaten gewählt, welche mit den o.a. angeführten Softwaretools genauso erzeugbar wären:

- .laz: Beruhend auf dem .las Format mit zusätzlicher (verlustfreier) Komprimierung. Reduziert Laufwerkspeicher auf Kosten von zusätzlicher Rechenleistung beim Dekodieren bzw. Visualisieren der Punktwolke.
- .ply (Polygon File Format): basiert auf ähnlichen Prinzipien wie das näher beschriebene .obj Format, in dem 3D-Objekte durch die Aufstellung von Dreiecksflächen definiert werden. Da maximale Präzision bei der Erstellung der Punktwolken im Vordergrund steht, wurde dieses Format nicht für Punktwolken verwendet.
- .dxf (Drawing Interchange Format): ist ein von Autodesk definiertes Format, das vor allem für die Portierung externer Daten in unterschiedliche Autodesk Software (z.B. AutoCAD) verwendet wird. Da die Anpassung an Autodesk-Schnittstellen nicht im Vordergrund steht, wurden Formate dieses Typs allgemein nicht erzeugt.

Die optionalen Parameter für die Prozessierung sind von den Zielsetzungen sowie dem Softwaretool abhängig, wobei Systemanforderungen, Prozessierungsdauer und Speicherbedarf bei Einstellung höherer Genauigkeit entsprechend anwachsen. Dementsprechend kann es sinnvoll sein, die Vollständigkeit der Aufnahme mit niedriger Detailtiefe und kurzer Rechenzeit zu ermitteln. Erst wenn die Vollständigkeit und Richtigkeit gegeben ist, wird der Start einer Prozessierung mit hoher Genauigkeit sowie vielfach mehreren Tagen Rechenzeit sinnvoll sein. Für alle Anwendungsfälle wurden demnach individuelle Anpassungen vorgenommen sowie Vergleichsberechnungen mit anderen Tools durchgeführt. Nachstehende Aufstellung zeigt ein Beispiel für die eingestellten Prozessierungsparameter mit PIX4D:

Image scale	= <1 (Original image size, Slow)>
Multiscale	= <yes>
Point density	= <Optimal>
Minimum number of matches	= <3>
Matching window size	= <9x9 pixels>
Point Cloud Filters	
Use densification area	= <yes>
Use annotations	= <yes>
Limit camera depth	= <yes>
Output	
Save PLY	= <no>
Save XYZ	= <no>
Save LAS	= <yes>
Save LAZ	= <no>
Merge Tiles into One File	= <no>
Run classification	= <yes>

Zu erwähnen ist der „Minimum number of matches“ Parameter, der ausschlaggebend dafür ist, ob unterschiedliche Bilder gematcht (also in Relation zueinander geographisch verortet) werden können oder nicht. Ein höherer Wert bedeutet hier, dass striktere Matching-Voraussetzungen gefordert werden, damit ein spezifisches Matching als erfolgreich betrachtet wird. Dadurch werden mehr Eingabeinformationen verworfen, was je nach Use-Case (und Aufnahmequalität) zu Lücken bzw. unvollständigen Modellen führen kann, gleichermaßen jedoch auch die Artefakte durch Störfaktoren (Vegetation im Hintergrund, fahrende Autos auf einer Straße, etc.) reduziert.

.obj - TIN (Triangulated Irregular Network): Sie werden aus Punktwolken erstellt und stellen eine (speicher-) ressourcenoptimierte Möglichkeit dar, dreidimensionale Modelle zu kodieren. Statt jeden aufgenommenen Berührungspunkt eines Laserscans mit Lokalisationsdaten abzuspeichern, werden Modelle als Polygonnetze (bzw. in diesem Fall konkret als Dreiecksnetze) dargestellt. Glatte Flächen können dadurch beispielsweise verlustfrei gespeichert werden, indem eine Fläche anhand ihrer Eckpunkte definiert wird, wodurch die allgemeine (Laufwerk-) Speicherauslastung stark reduziert wird (was z.B. Vorteile in der Übertragung, etwa bei Echtzeit-Anforderungen in der Ergebnisdarstellung über das Internet bringt).



Abbildung 33: N1 Schüttmure - 3D Rekonstruktion Fotogrammetrie (TIN)

Unter Einbeziehung bereits erwähnter Abweichungen für individuelle Prozessierungen, die an späterer Stelle im Detail geklärt werden, seien hier die als Ausgangslage verwendeten Parameter bei der Erstellung von 3D-Meshes im .obj Format am Beispiel von Pix4D festgehalten:

Generate 3D textured mesh	= <yes>
Resolution	= <High Resolution>
Maximum Octree Depth	= <12>
Texture size	= <8192x8192>
Decimation Criteria	= <Quantitative>
Maximum number of triangles	= <1000000>

Color Balancing	= <no>
Save PLY	= <no>
Save OBJ	= <yes>
OBJ Tiled Texture	= <no>
Save FBX	= <no>
Save DXF	= <no>
Save PDF3D	= <no>
PDF3D Logo	= <>
LOD Export	
Export OSGB	= <no>
Export SLPK	= <no>
Level Count	= <4>
Texture Quality	= <0>

.tif (GeoTIFF) – Orthomosaik:

Ist ein zweidimensionales Ausgabeformat, das zwei Verarbeitungsschritte zu einer Ausgabe verbindet. Erster Verarbeitungsschritt ist die Ausgabe in Form eines Orthofotos, also eines 2D-Abbildes, in dem perspektivische Verzerrungen zugunsten einer maßstabgetreuen Darstellung algorithmisch entfernt werden.

Der zweite Verarbeitungsschritt beschreibt die Bezeichnung „Mosaik“ das Zusammenfügen mehrerer unterschiedlicher bzw. differenzierter Eingabedaten, die (ähnlich der 3D-Modell-Erstellung) gematcht werden, um die relative Position von abgebildeten Objekten zu berechnen, und diese anschließend in maßstabgetreuer Abbildung zu kombinieren. Das Endresultat ist ausgelegt, um als einzelnes, extrem hochauflösendes 2D-Bild dargestellt werden zu können. In der Praxis wird das Format wieder in unterschiedliche „Tiles“ (Kacheln) separiert, die dynamisch in der Visualisierung nachgeladen und in einer an den Zoom-Level angepasste Auflösung repräsentieren werden können.



Abbildung 34: Anwendung N3 h1 - 3D Rekonstruktion Grid niedrig (DOP - Übersicht)



Abbildung 35: Anwendung N3 h1 - 3D Rekonstruktion Grid niedrig (DOP - Detailausschnitt)

GeoTIFF (*Georeferenced Tagged Image File Format*)

Der *GeoTIFF* steht speziell für ein .tif Format, in dem die in den Metadaten vorgesehene Option zur Georeferenzierung wahrgenommen werden und einzelne Tiles (oder das Gesamtbild im Falle von alleinstehenden .tif Dateien) mit Georeferenzierungsinformationen versehen sind.



Abbildung 36: Anwendung N3 h1 - 3D Rekonstruktion Grid niedrig (DOP) – Via Geolokalisierung auf Karte verortet (Visualisierung: Pix4DMapper – Viewer)

Für die Orthomosaik-Erstellung werden an dieser Stelle ebenfalls die Prozessierungsparameter am Beispiel der Software Pix4D angeführt:

DSM and Orthomosaic options	
Resolution [cm/pixel]	= <-1>
Filters	
Use noise filtering	= <yes>
Use surface smoothing	= <yes>
Surface smoothing type	= <Sharp>
Raster DSM	
Save DSM TIFF	= <yes>
Method	= <Inverse Distance Weighting>
DSM TIFF merge tiles	= <yes>
GridDSM	
Save grid DSM XYZ	= <no>
XYZ delimiter	= <Semicolon>
Save grid DSM LAS	= <yes>
Save grid DSM LAZ	= <no>
Grid DSM spacing [cm]	= <100>
Orthomosaic	
Save orthomosaic TIFF	= <yes>
Use visibility	= <yes>
Use color balancing	= <yes>
Save orthomosaic TIFF merge tiles	= <no>
Save orthomosaic TIFF without transparency	= <no>
Save KML	= <no>
Additional outputs options	
DTM	
Save DTM TIFF	= <yes>
DTM TIFF merge tiles	= <yes>
Resolution [cm/pixel]	= <-5>
Contour lines	
Save contour SHP	= <yes>
Save contour PDF	= <no>
Save contour DXF	= <no>
Contour base (in LinearUnit)	= <0>
Elevation interval (in LinearUnit)	= <10>
Resolution [cm]	= <100>
Minimum line size [points]	= <20>

Index options	= <-1>
Resolution [cm/pixel]	= <Gauss>
Downsampling strategy	= <no>
Save reflectance map TIFF	= <no>
Merge Reflectance Tiles	= <no>
Save Index Grid	= <200>
Save Index grid resolution	= <no>
Save Index Range	= <400>
Save Index Range resolution	= <[]>
Indices to generate	= <no>
Has Regions	

3.3.3 Visualisierung der Ergebnisse

Die Visualisierungskomponente muss in der Lage sein, die LiDAR- und Rasterdaten sowie die Ergebnisse aus der Extraktion als Geometrieelemente darzustellen und gegebenenfalls mit Vektordaten aus Plänen oder extrahierten Schadensmerkmalen etc. zu überlagern.

Die integrierten Werkzeuge sollten demgemäß u.a. folgende Hauptfunktionalitäten abdecken:

- Anzeige der LiDAR Punktwolke und Rasterdaten
- Filtermöglichkeiten, um Punkte mit bestimmten Parametern auszublenden oder anzuzeigen, z.B. Punkte nach Höhe oder Intensität zu filtern.
- Vektorinformationen können als Overlay eingeblendet werden, wie zum Beispiel erkannte Schäden oder Betriebsinformationen.
- Die gemeinsame Anzeige und Verschneidung mehrere Versionen von Punktwolken aus unterschiedlichen Aufnahmen aus dem gleichen Betrachtungsbereich
- Abstands, Flächen- und Volumenmessung in der Bilddarstellung
- Hinzufügen von Annotationen und Kommentaren

Recherche und Praxis

Die Visualisierung der Ausgabedateien ist aufgrund der vorhandenen Datengröße nicht trivial und erfordert gerade für „flüssige“ Navigation durch 3D-Modelle oder eine web-basierte Darstellung häufig Nachbearbeitungen, die aus der Gesamtlast darstellbare - in der Regel flexibel nachladbare – Modelle erstellt. Neben der „flüssigen“ Darstellbarkeit, wurden unterschiedliche Visualisierungswerkzeuge außerdem auf die Möglichkeit untersucht, Annotationen und Markierungen herzustellen und anzuzeigen. Wichtig dabei ist, dass Annotationen und Markierungen die Genauigkeit der 3D-Modelle nicht beeinflussen dürfen. Allgemein bedeutet das, dass die originalen Ausgabedaten der Prozessierung nicht verändert werden sollen, sondern vielmehr separate Informationen angelegt werden sollen, die optional zu den Originaldaten angezeigt werden können.

Idealerweise wird das durch zusätzlichen Layer in demselben Format gelöst, in dem die jeweiligen Originaldaten vorhanden sind. Dadurch ist garantiert, dass Visualisierungswerkzeuge, mit denen die Originaldaten angezeigt werden können, gleichermaßen die Anmerkungs-layer darstellen können. Ein Hindernis sind proprietäre Formate, die von den meisten Visualisierungswerkzeugen für Anmerkungen und Markierungen verwendet werden, und die es unmöglich machen, erstellte Anmerkungen mit anderer Visualisierungssoftware anzuzeigen als jene, in der sie erstellt wurden. Hier ist eine entsprechende Standardisierung bzw. Verwendung von Standardformaten zu empfehlen.

Weiters hat sich gezeigt, dass die Prozessierung und Anzeige der Daten aus der 3D – Rekonstruktion teilweise erhebliche Rechenzeit und entsprechend leistungsstarke Rechner sowie Grafikkarten erfordert. Für die Prozessierung und Extraktion von Merkmalen wird es sinnvoll sein, eine möglichst hohe Genauigkeit zu wählen, um Informationsverluste zu vermeiden. Weiters wird es sinnvoll sein, die Originaldaten möglichst lange speichern, da diese dann auch zu einem späteren Zeitpunkt mit neueren Tools oder Algorithmen ausgewertet werden können. Weiters wird es sinnvoll sein, entsprechend reduzierte 3D – Modelle und Ergebnisse vorab berechnen, die dann zusammen mit den extrahierten Informationen auch auf herkömmlichen Rechnern darstellbar sind. Die Verwendung entsprechender Smoothing – Algorithmen zusammen mit hochauflösenden Texturen erlaubt eine substanzielle Reduktion von Datenmenge und Komplexität ohne zu große Verluste in der Darstellungsqualität (Abbildung 37).

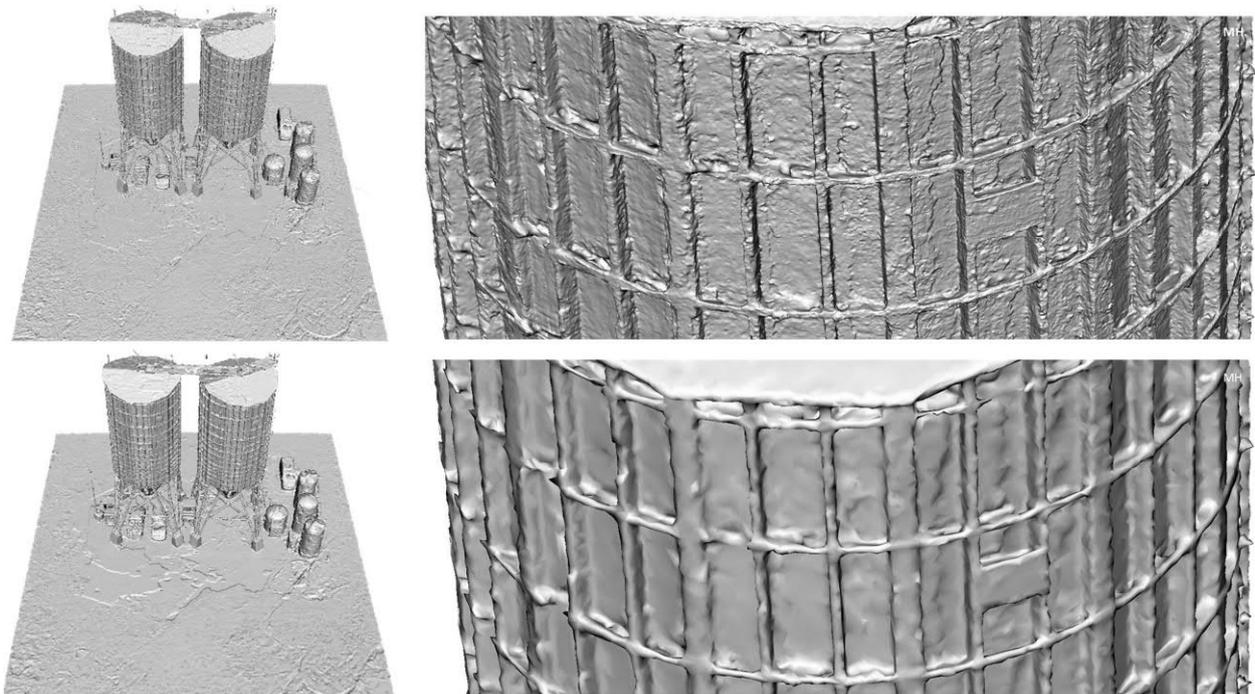


Abbildung 37: B4 Graz - Raaba – Hochauflösende Prozessierung und 3D – Mesh (oben) sowie um den Faktor 20 reduziertes 3D – Mesh (unten) jeweils ohne Textur (Datenreduktion Faktor 10-20)

Alle angeführten Softwaretools für die Prozessierung und Rekonstruktion verfügen über mehr oder weniger leistungsfähige Viewer sowie die Möglichkeit externe Aufnahmedaten (z.B. LIDAR) sowie Ergebnisse darzustellen. Welches Softwaretool für den jeweiligen Anwendungszweck am besten geeignet ist, kann nicht von vorneherein definiert werden, sondern erfordert entsprechende Recherchen und Vergleiche (z.B. mit Testversionen). Zudem ist zu beachten, dass die jeweiligen Hersteller unterschiedliche Funktionalitäten und Gebührenmodelle anbieten, die bei der Auswahl zu beachten sind.

Beispielhaft soll nun in der Folge mit dem Pix4DModeller ein ausgewähltes Softwaretool kurz beschrieben werden. Dieses lässt sich als unabhängiger Viewer benutzen, wobei die hier anfallenden Lizenzgebühren von mindestens 42€/Monat den Pix4DModeller nur dann kosteneffizient gegenüber anderen Optionen machen, wenn er tatsächlich auch für die Generierung von 3D-Modellen genutzt wird. Im Pix4DModeller ist ein effizienter Viewer integriert, mit dem auch große Datenmengen weitgehend „flüssig“ dargestellt werden können. Mit einer Refresh-Zeit von ca. 1-5 Sekunden, bevor die neue Perspektive sich „glättet“, liegt dieser Viewer nicht hinter anderen wesentlich teureren Visualisierungswerkzeugen.

Weiters bietet der Pix4DModeller die Möglichkeit, ein Modell mit Annotationen zu versehen. Diese sind jedoch auf einfache Markierungen und Texte beschränkt. Es besteht keine effiziente Möglichkeit erstellte Annotationen zu exportieren, was den Pix4DModeller für eine Verwendung in einem komplexeren Workflow wie dem Asset Management limitiert. Die in Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellten Beispiele zeigen jedoch auch, dass es mit dem Pix4DModeller bereits jetzt möglich ist sowohl große Streckenabschnitte als auch hochauflösende Detailmodelle über den Webbrowser zu visualisieren. Als Alternative für eine schnelle Ansicht kleinerer 3D – Modelle stehen zudem auch eine Reihe kostenloser Tools zur Verfügung (FBX – Viewer, Blender etc.). Für weitergehende Hinweise und aktuelle Informationen zu diesem Thema wird jedoch ausdrücklich auf die Websites der Anbieter der entsprechenden Softwaretools verwiesen.



Abbildung 38: Pix4DModeller (Ansicht Big Data - Überblick 36 km Autobahn - Dezimeter)



Abbildung 39: Pix4DModeller (B2 Italienschleife - Orthoplane und Inspektion Bogen 34) inklusive einer Annotation aus RISKMON (Ansicht: Mesh - Submillimeter)

3.4 Georeferenzierung

Die Geodatenreferenzierung findet in unterschiedlichen Prozessierungsphasen auf unterschiedliche Art statt. Vorrangig und zu jedem Zeitpunkt nach der Erstellung einer Lieferung vorhanden, werden lieferungsspezifische Bounding Boxes unter den Projektmetadaten („Projektname.xml“) abgelegt. Die Bounding Box beschreibt unter Verwendung globaler Koordinaten eine definierte Fläche, die sämtliche Projektdaten umschließt. Gleichzeitig sind sämtliche Aufnahmen mit eigenen Verortungsinformationen versehen. Durch diese können Kameraposition und Ausrichtung ermittelt werden. Diese Informationen werden für die Berechnung von 3D-Modellen verwendet, sowie im Zuge der Visualisierung – z.B. für die Einsicht der Rohdaten bei spezifischer Auswahl anhand des berechneten 3D-Modells („Inspect“-Feature). „Tiling“ ist für die Visualisierung großer Modelle unerlässlich. Hierbei wird ein einzelnes Modell anhand seiner Bounding Box in Teilbereiche untergliedert. Das dabei zugrunde liegende Prinzip und die Einzelheiten der Implementierung werden im Folgekapitel beschrieben.

Projekt-Georeferenzierung: Lieferungsabhängige Bounding Box:

Wie bereits angeführt ist die Georeferenzierung auf Lieferungsebene für die kartografische Einordnung der Lieferungen und für Suchfunktionen auf Basis geographischer Parameter notwendig. Die Georeferenzierung von Projektdaten sind nicht an ein bestimmtes Referenzsystem gebunden. Entsprechend strukturierte Metadaten gestatten die Verwendung beliebiger Koordinatenreferenzsysteme (CRS). In RISKMON wurde im Rahmen der Aufnahme, Prozessierung und Weiterverarbeitung EPSG:4326 (WGS84) verwendet. EPSG:4326 ist die EPSG-Kennung, die auf WGS84 referenziert, welches allgemein als gebräuchliches internationales Referenzsystem gilt.

Tabelle 36: Bezugsellipsoid

Große Halbachse (a)	Kleine Halbachse (b)	Abplattungsfaktor (1/f)
6378137.0m	6356752.314245m	298.257223563

Datenlokalisierung: Individuelle Lokalisierungsinformationen:

Bei der Bearbeitung zur Visualisierung der georeferenzierten Daten gibt es zwei wesentliche Bearbeitungsstrategien bezüglich der Lokalisierungsmetadaten der anzuzeigenden Elemente. Einerseits können Viewer und Eingabedaten auf globalen Koordinaten basieren, andererseits können Koordinaten in ein lokales Koordinatensystem übersetzt werden. In letzterem Fall kann entweder eine Bounding Box oder ein bestimmter Punkt als definierte Referenz dienen, während individuelle Referenzdaten als in Abhängigkeit zum verorteten Referenzbereich lokalisiert werden.

Im Projekt RISKMON wurden sowohl bei der persistenten Speicherung als auch für die Visualisierung globale Georeferenzsysteme verwendet. Bevor die Einzelheiten dieses Designs im Detail beschrieben werden, seien kurz die Vor- und Nachteile lokaler Referenzsysteme erwähnt. Allgemein betrachtet ist der Vorteil von lokalen Referenzsystemen die geringere Rohdatenmenge von verorteten 3D-Modellen. Da globale Koordinatensysteme entsprechend größere Datentypen (z.B. floating integer mit 32 bits vs. integer mit Bedarf von 8 bits) benötigen als lokale für die gleiche Präzision, ergibt sich gerade beim Übertragen sehr dichter, nicht großflächig ausgedehnter Modelle ein enormer Overhead, der durch die kleine relative Bounding Box-Größe durch lokale Referenzsysteme vollständig vermieden werden kann.

Neben einer vollständigen geometrischen Projektion globaler Koordinaten in lokale Referenzsysteme gibt es andere Kodierungsmöglichkeiten, welche die benötigten Berechnungsschritte zur Reproduktion globaler Informationen minimal hält, wie im für LiDAR Scans verwendeten .las-Format. Hier findet die Transformation der Daten mithilfe einfacher Scale- sowie Offsetfaktoren statt, also durch das einmalige Anwenden eines Multiplikations- sowie Additionsschrittes im Zuge der Kodierung bzw. Dekodierung.

Globale Referenzsysteme:

Im Falle des RISKMON Speichersystems, wo kartographische Einordnung ein wesentlicher Bestandteil der Nutzungsanforderungen ist, wird die Verwendung lokaler Projektionen nicht als effizient angesehen. Während eine oberflächliche Verortung auf der Karte noch vergleichsweise trivial ist, da hier nur die Grenzen der Bounding Box transformiert werden müssen, stößt man auf große Herausforderungen, sobald die Visualisierung unterschiedlicher Layer flüssig und zeitnah ermöglicht werden soll. Geht man von einem Datenmanagementsystem aus, das mit einem lokalen Referenzsystem arbeitet, wäre die Visualisierung unterschiedlicher Elemente, die gemeinsam in ein lokales System transformiert wurden (auf Basis einer Bounding Box, welche sämtliche Bounding Boxes der unterschiedlichen Eingaben beinhaltet) zwar nicht anspruchsvoll, die gleichzeitige, korrekte Visualisierung separat prozessierter Eingabedaten würde jedoch eine vollständige inverse Transformation der Eingabedaten erfordern. Die Datenmanipulation bzw. -bearbeitung profitiert demnach von der durchgängigen Verwendung eines einzigen Georeferenzsystems, weshalb deren Verwendung generell zu empfehlen ist.

3.5 Tiles, Clipping und Layering

Im Kontext der Visualisierung ist der Umgang mit großen Datenmengen ein kritischer Faktor, da es hier nicht mehr um den Zeitverlust durch Transfer oder Aufrufen von persistent gespeicherten Informationen geht, sondern um harte Limits, ab denen der Grafik- bzw. Arbeitsspeicher nicht mehr in der Lage ist, den theoretisch vorhandenen Informationsgehalt verfügbar zu halten. So führen z.B. LiDAR Scans und resultierenden Punktwolken mit einer Auflösung von ca. 2.5 cm per Pixel bereits mit überschaubaren Szenen zu einer enormen Datenmenge. Für die Bewältigung der Herausforderung bei der 3D Visualisierung von großen Datenmengen werden daher vielfach Strategien wie Tiling, Clipping und Layering angewendet.

Clipping:

Clipping ist eine ältere Strategie der Computerverarbeitung, die dadurch definiert ist, dass Daten, die nicht zur Verarbeitung erforderlich sind „abgeschnitten“ werden. Spezifischer hat der Begriff sich in der Computergrafik in Bezug auf Daten entwickelt, die außerhalb des visualisierten Bereichs liegen und daher in einem möglichst frühen Stadium der Graphik-Pipeline aus dem Speicher entfernt werden.^{26 27}

²⁶ https://www.khronos.org/opengl/wiki/Rendering_Pipeline_Overview#Clipping
 Status: 8.10.2019

²⁷ „Möglichst früh“ ist hier in Abhängigkeit der jeweiligen (3D-)Struktur und sonstiger Optimierungen in der Grafikkarte zu verstehen und kann nicht allgemein eindeutig definiert werden. Bei der Betrachtung von 3D-Meshes, beispielsweise, kann Clipping die Aufteilung vorhandener Strukturen in kleinere Strukturen beinhalten, während bei Punktwolken lediglich die Berechnung erfolgt sein muss, die angibt, ob eine Szene einen bestimmten Punkt enthält oder nicht.

Tiling:

Tiling bezeichnet das Aufteilen einer Szene in unterschiedliche „Kacheln“, die jeweils aus bestimmten Ausschnitten der gesamten Szene bestehen und wird als Schritt der Preprozessierung betrachtet, dessen Ausgabe persistent gespeichert und bei Bedarf aufgerufen wird. Der Vorteil bei der Visualisierung von getilten Szenen gegenüber unbearbeiteten Szenen ist die Möglichkeit des Ladens in den Arbeitsspeicher, bzw. eine effizientere Übertragung über Netzwerke. Tiling wird vor allem in Bezug auf Punktwolken angewendet, wo jedes angezeigte Element mit eigenen Koordinaten versehen ist, und in vielen Fällen keine weitere Dekodierung stattfinden muss, um Elemente etwa in einen Octree oder Quadtree einzuteilen.

Layering:

Der Einsatz bzw. das individuelle Anfordern individueller Layer, die dieselbe Position in unterschiedlichen Qualitätsstufen anzeigen können wird hier als Layering bezeichnet. Layering und Tiling können unabhängig voneinander existieren, gleichermaßen kann Layering aber als Teilpriorität des Tilings umgesetzt werden. Diese Strategie wurde beim 3D-Viewer des RISKMON Projekts umgesetzt. Szenen werden in einem ersten Durchlauf in 4 Parent-Tiles aufgeteilt, welche wiederum jeweils in 4 Children-Tiles geteilt werden, usw.

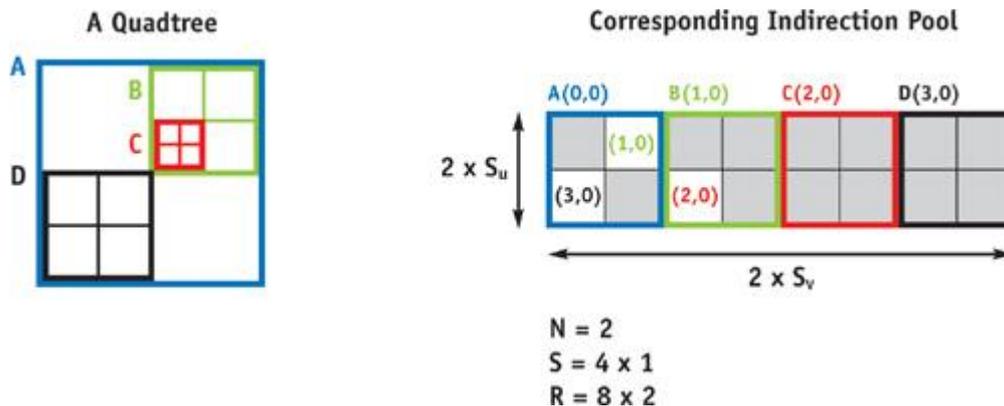


Abbildung 40: Konzeptuelle Erstellung eines Quadtrees²⁸

Bestimmende Faktoren für die minimale Größe der Tiles untersten Levels muss dadurch nicht explizit vorgegeben werden, sondern kann vollständig an die Dichte der ursprünglichen Punktwolke angepasst werden. Dadurch kann auch der 3D-Viewer ohne weiteren Overhead die anfordernden Tiles an die Spezifikation der maximal zu renderndem Punkt anpassen, welche allgemein als statische Vorgabe für die Ressourcenanforderungen beim Rendering von Punktwolken zu betrachten ist.

²⁸ Quelle: https://developer.nvidia.com/gpugems/GPUGems2/gpugems2_chapter37.html
Status: 08.10.2019

3.6 Punktwolke, Tin, Mesh, 3D – Objekte, Textur

Die Prozessierung der Daten aus der Fotogrammetrie erlaubt die Erstellung von Punktwolken, die Extraktion der Geometrie mittels vermaschtem Dreiecksnetz sowie die Erstellung von 3D – Objekten ohne bzw. mit Textur. Weiters können entsprechende Ansichten oder Orthoprojektionen der prozessierten Modelle abgesetzt werden. Während für einfache geometrische Operationen und Differenzberechnungen Punktwolken oder Tin ausreichen, ist für die Schadensbeurteilung in aller Regel ein 3D – Objekt mit hochauflösender Textur oder Orthoplane erforderlich. Nachstehend sind ausgewählte Ergebnisse der Prozessierung sowohl in Hinblick auf eine Schadensbeurteilung, als auch einer Gesamtübersicht in RISKMON dargestellt (Abbildung 41 bis Abbildung 46).

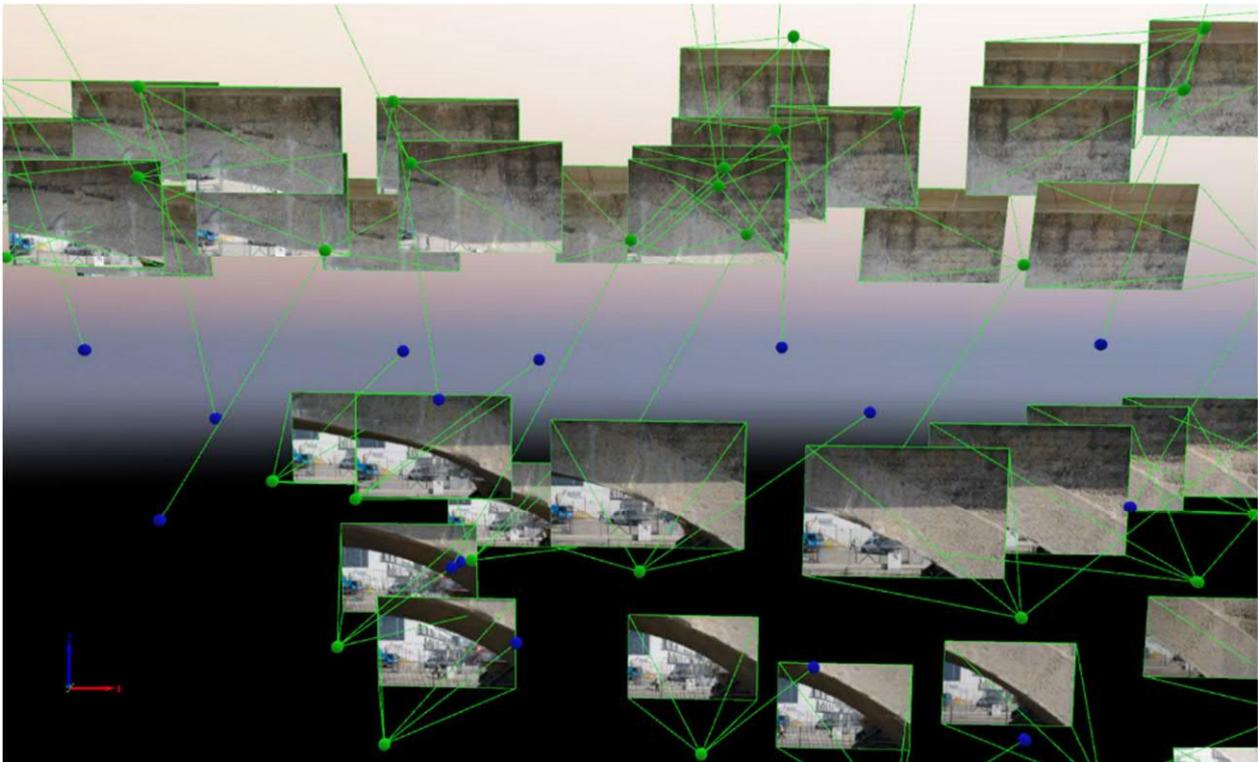


Abbildung 41: Fotogrammetrische Erfassung (Italienschleife - Bogen 34)

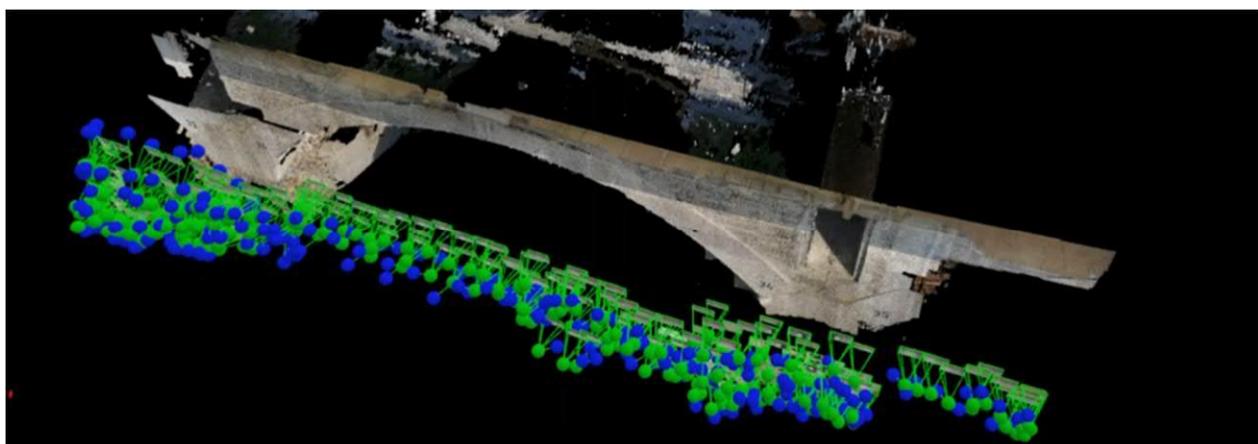


Abbildung 42: Punktwolkenberechnung aus Fotogrammetrie (Italienschleife - Bogen 34 unbereinigt)



Abbildung 43: Punktwolke - Nahansicht eines Risses in Bogen 34 (Italienschleife - Bogen 34)



Abbildung 44: Nahansicht des Risses im texturiertem 3D Modell (Italienschleife - Bogen 34)

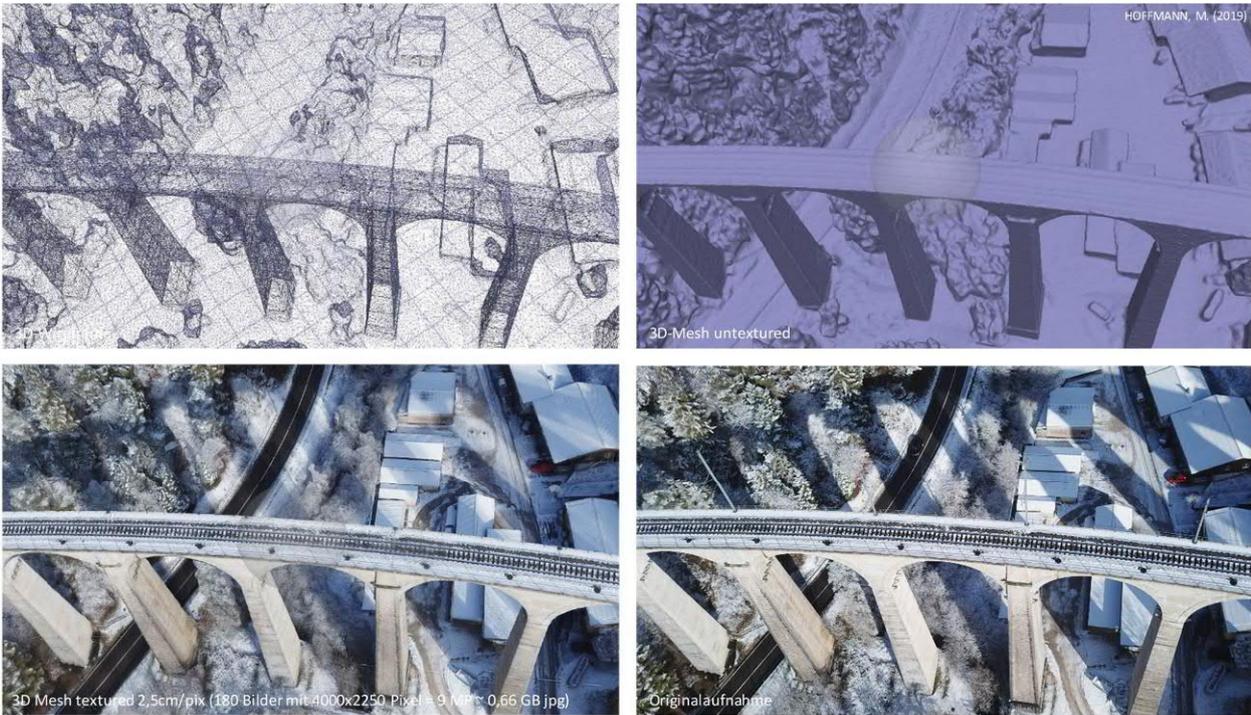


Abbildung 45: Photogrammetrie von a) Wireframe (TIN-Netz) zu b) meshed 3D – Objekt (Solid) bis zu c) texturiertem 3D – Modell im Vergleich zu d) Originalaufnahme (Beispiel Pont St. Ursanne)

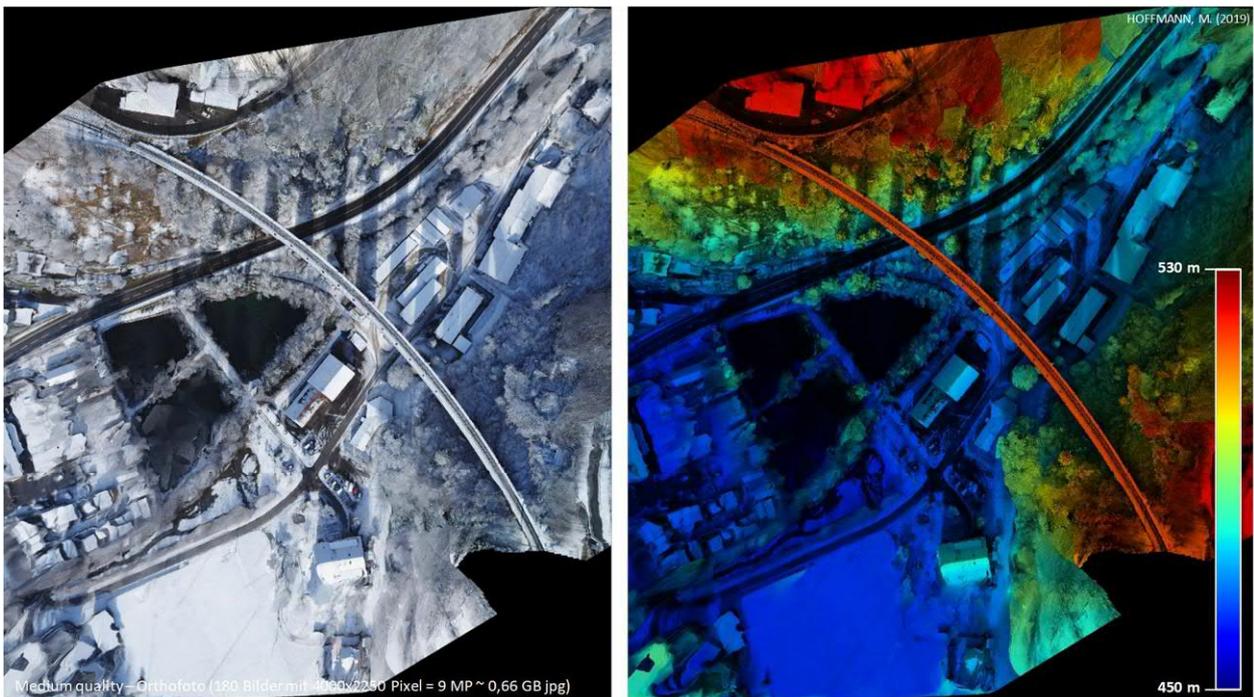


Abbildung 46: Photogrammetrie mit a) Orthofoto auf Basis des 3D – Mesh (texturiert) sowie b) 2,5 D – Höhenmodell auf Basis des 3D – Mesh (Beispiel Pont St. Ursanne)

3.7 Filterung, Editierung, Speicherung und Export

Im Gegensatz zu herkömmlichen stark aggregierten Bestand- und Zustandsdatensystem (1D – Punkt und 2D – Linieninformationen bzw. Listenformate) sind in RISKMON dreidimensionale Daten und deren zeitliche Änderung zu verarbeiten (3D – Modelle mit Veränderung = 4D). In der Datenverarbeitung und Integration ergeben sich daraus klar definierte Anforderungen je nach Anwendungsfall. Dementsprechend sind die vorhandenen Bestandssysteme um entsprechende Software – Tools bzw. Funktionalitäten zu erweitern, die im Rahmen von RISKMON nur konzeptiv aufgezeigt werden können.

Auf der freien Strecke wird man (abgesehen von der Fahrbahndecke zur Schadensbeurteilung) üblicherweise mit einer geringeren Auflösung auskommen (z.B. 50-500 Bildpunkte je m²). Bei Objekten und Bauwerken muss die Auflösung dagegen substanziell höher sein. Bei 1 mm Risserkennung ergibt sich eine Mindestauflösung 1.000 x 1.000 Pixel je m² bzw. dem doppelten Wert gemäß der Samplingtheorie. Zudem sind Höheninformation und Textur erforderlich, da sonst viele Auffälligkeiten nicht ausreichend erkennbar bzw. detektierbar sind (Punktwolke – Mesh – Mesh und Textur). Eine sinnvolle Abgrenzung ist die Lieferung des 3D-Datensatzes innerhalb einer definierten Boundingbox bzw. eine Lieferung der erkannten Schäden und Auffälligkeiten als eigener Layer und Beschreibung mit Visualisierung in einem geeigneten Viewer. Die Schadenserfassung kann dabei sowohl manuell, als auch (teil-)automatisiert erfolgen. Analog zu den bestehenden Ansätzen kann dann auf dieser Basis eine fachliche verbale Beurteilung mit Noten sowie Kommentare in Listenform analog zu den Bestandssystemen ergänzt werden.

Im Zuge von RISKMON wurde ein Datenmanagementkonzept und darauf aufbauend ein robustes und flexibles Datenmanagement für heterogene Datenquellen wie z.B. LiDAR Daten, Punktwolken, Meshes, Orthofotos, Luftaufnahmen, etc. umgesetzt und in mehreren Systemtests erprobt. Sowohl die mittels UAS aufgenommenen Rohdaten, als auch die errechneten Modelle und Zwischenergebnisse sollen in einer Datenbank abgelegt werden. Diese Methode stellt einerseits die Nachvollziehbarkeit der getätigten Berechnungen sicher und hat andererseits den Vorteil, dass die gesammelten Daten jederzeit verfügbar sind. Dementsprechend wurde ein Workflow und eine Methodik für die Verarbeitung großer Datenmengen in RISKMON konzipiert. Der Fokus des entwickelten Konzeptes ist darauf gerichtet, extrem große verortete Datenmengen in einem Koordinatensystem effizient und hoch performant verarbeiten zu können. Der Ansatz zur Datenqualitätssicherung erarbeitet, orientiert sich primär an Metadaten (z.B. beschreibende Metadaten, Prozessmetadaten, etc...). Dies ermöglicht nachvollziehbare und konsistente Ergebnisse. Auch wurde untersucht, inwieweit kommerzielle (z.B. Oracle RDBMS) oder OSS (Open-Source-Software) (z.B. PostgreSQL) Datenbanken speziell bezüglich Geschwindigkeit und Datensicherheit für diese Art der Datenhaltung geeignet sind.

Eine wesentliche Herausforderung besteht in der Selektion und anschließenden Verarbeitung der erfassten Datenmengen. Um einen performanten und gesicherten Zugriff auf die Daten zu gewährleisten, wird eine separate Speicherung von Daten und Metadaten empfohlen. In einer ersten Speicherstruktur werden die Metadaten vorgehalten und in einer zweiten Speicherstruktur die gelieferten Daten. Durch die Trennung der Daten auf zwei unterschiedlichen physischen Servern ist eine spätere Skalierung der Systeme gewährleistet. Zu Recherchezwecken und Abfrage der Daten werden die ISO-19115 konformen Metadaten über einen Katalog Service (CSW) publiziert.

Datenstruktur einer Lieferung konform ISO-19115:

Eine Lieferung besteht im Wesentlichen aus drei hierarchischen Elementen, wobei jedes dieser Elemente eine eigene Metadaten Dateityp besitzt (Projekt, Datentyp und Rohdaten). Die Lieferebene enthält allgemeine Informationen zur Lieferung. Da mehrere unterschiedliche Rohdaten demselben Projekt zugeordnet werden können, befinden sich hier allgemeingültige Informationen zu den jeweiligen Projekten. Neben Informationen beispielsweise zum verwendeten Koordinatensystem befinden sich hier auch eindeutig generierte Identifier, welche das Zuordnen unterschiedlicher Daten zu den jeweiligen Projekten ermöglicht. Die Datentyp-Ebene liegt hierarchisch eine Ebene unter der Projektdefinition. Jedem Datentyp ist immer ein Datei-Ordner zugeordnet, in dem sich mindestens ein Rohdatenelement befindet. Zu allen Rohdaten gibt es eine weitere Metadaten-Datei. Die jeweiligen Rohdaten befinden sich ebenfalls in diesem Verzeichnis. Auf der Rohdaten-Ebene befinden sich auch strukturell relevante Daten, vor allem aber Metainformationen zu den jeweiligen Rohdaten. Diese Informationen beschreiben beispielweise Daten wie die geographische Bounding-Box oder das Erstellungsdatum.

In dem Forschungsprojekt RISKMON gelangten LiDAR Daten, Punktwolken, Meshes, Orthophotos, Luftaufnahmen, etc. für das Datenmanagement zur Anwendung. In der Praxis existieren hierfür zahlreiche Datenformate. Eine Herausforderung in RISKMON war die Bestimmung von Dateiformaten, die sowohl den Austausch und die Integration in bestehende Systeme ermöglichen, ohne dabei den Rahmen gängiger Standards zu verlassen. Ausgehend von den Basis-Anforderungen wurde ein geeignetes Datenbanksystem ermittelt, das auch in der Lage ist geospatale und dreidimensionale Daten vorzuhalten bzw. zu verarbeiten. Aufgrund dieser Anforderungen kommen drei Datenbanksysteme, je nach Verwendungszweck im Projekt RISKMON zum Einsatz:

- Oracle Spatial and Graph – geospatale Roh-Daten und Punktwolken,
- PostGIS – Metadaten mit geospatalen Bezug,
- H2GIS – operative Daten mit geospatalen Bezug.

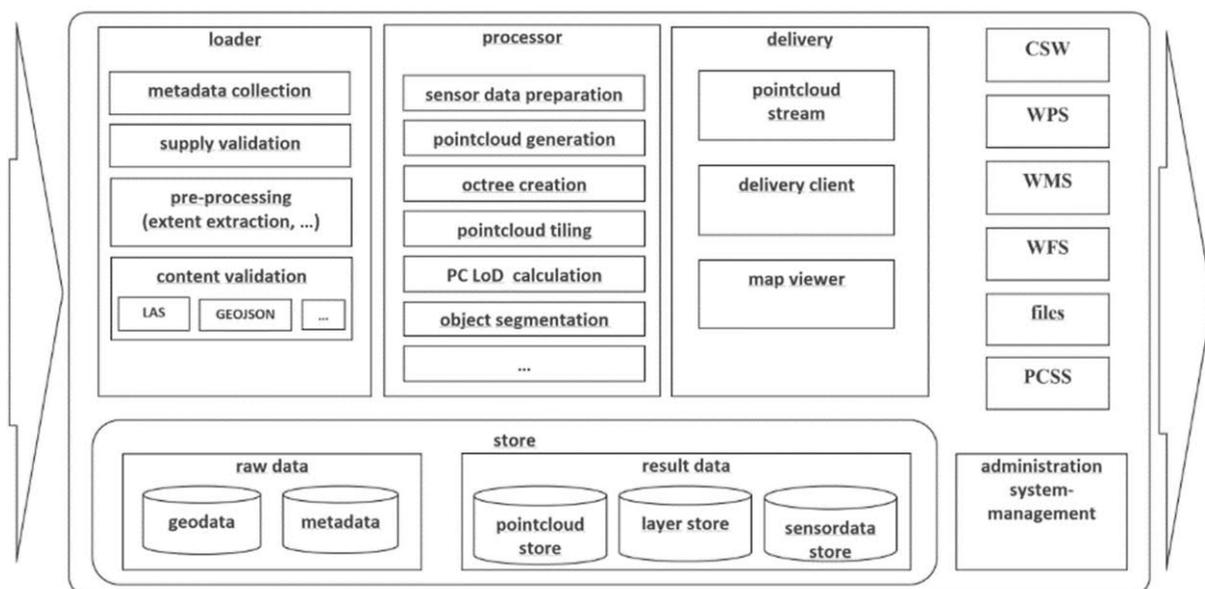


Abbildung 47: Datenmanagement funktionale Architektur

Der gesamte Prozess von der Definition der Anforderungen, dem Datenmanagement bis hin zur Visualisierung wurde im Forschungsprojekt RISKMON erarbeitet. So wurde u.a. spezifiziert, wie diese um ISO-19115 konforme Metadaten angereichert werden können. Die Erhebung der Metadaten erfolgt über ein von IQSOFT entwickeltes und spezielle für RISKMON erweitertes Eingabetool (IQSOFT AUG-Client). Nach Erstellung einer konformen Lieferung werden die Daten inklusive der Metadaten in einem strukturierten Format in der Datenbank persistiert. Im folgenden Prozessschritt werden die gespeicherten Daten automatisiert für die weitere Verwendung aufbereitet bzw. ausgewertet. Die Abfrage der Daten kann über eine standardisierte OGC konforme Katalogschnittstelle (CSW) erfolgen und anhand von WebServices den weiteren Verarbeitungsschritten zur Verfügung gestellt werden. Die aufbereiteten Ergebnisse stehen für Auswertungen und Visualisierung zur Verfügung.

Visualisierung

Im Rahmen von RISKMON wurde eine große Zahl von Software-Produkten für die interaktive 3D-Visualisierung evaluiert und anhand der Use -Cases erfolgreich getestet. Für die Visualisierung waren vor allem die Produkte Punktwolken, Meshes mit Textur und Orthofotos zu berücksichtigen. Die in den einzelnen Prozessierungsschritten erstellten Daten und Modelle sollen gemeinsam für eine 3D Visualisierung aufbereitet und angezeigt werden. Unterstützend dazu sind manuelle Interaktionen zur Auswahl und Analyse von zu betrachtenden Bereichen im 3D Raum notwendig. Die 3D Visualisierungen für große Punktwolken benötigen sehr große Bandbreiten, um eine kontinuierliche Betrachtung zu ermöglichen. Daher wurden im Rahmen von RISKMON unterschiedliche Streaming-Technologien hinsichtlich ihrer Eignung betrachtet, um den Datenfluss zum Visualisierungswerkzeug zu optimieren.

3.8 Vergleich Softwarelösungen

3.8.1 Räumliche Datenbanken mit linearer Referenzierung

Betreiber von Bahn- und-/oder Straßeninfrastruktur bilden ihre Anlagen meist linear ab (linear assets), was sowohl für die Herangehensweise als auch die logische Integration von dreidimensionalen Daten aus RISKMON eine spezielle Herangehensweise erfordert. Die ausgewählte Software sowie die u.a. entwickelten Tools sind in der Lage diese Aufgaben weitgehend automatisiert zu übernehmen und schaffen damit die Grundlagen für weitergehende Analysen und Auswertungen im Asset Management der Betreiber. Ein wichtiger Punkt bei der Konzeption von RISKMON ist die Betrachtung eines geeigneten Datenbanksystems für die anfallenden Daten der teilautomatisierten Inspektionen. Wesentliche Kriterien aus Datensicht sind:

- der geographische Bezug
- die großen Datenmengen
- die Datensicherheit.

Weitere Kriterien zur Auswahl ergeben sich bei detaillierterer Betrachtung der im Zuge von RISKMON hervorgebrachten Daten. Im Zuge von RISKMON werden folgende Daten erhoben:

- Orthofotos horizontal, Fahrbahn, Trasse, Dächer, etc. (.jpg, .tiff)
- Orthofotos vertikal, z.B. Brücken, Fassaden, etc. (.jpg, .tiff)
- Multispektralaufnahmen z.B. Fahrbahn, etc. (.jpg, .tiff)
- kolorierte Punktwolke z.B. Brücke, Mure, Lawine, Gebäude, etc. (.las, .xyz)

Aus den erhobenen Daten abgeleitet bzw. automatisiert, teilautomatisiert bzw. manuell ergänzt werden u.a. die folgenden Daten bzw. Datenformate:

- Kennzeichnungen von Auffälligkeiten mittels Text und geographischen Vektoren (.shape)
- Höhengschichtmodell z.B. Mure, Lawine (.shape)
- Vermaschte und texturierte Punktwolke z.B. Brücke (.obj)

Räumliche Daten repräsentieren die wesentlichen geometrischen Charakteristiken von Objekten, und damit ihre Beziehung zum Raum, in dem sie existieren. Eine räumliche Datenbank ist eine Sammlung an Funktionen und Prozeduren, die es ermöglichen, räumliche Daten zu speichern, zurückzugewinnen, zu ändern und Abfragen darauf auszuführen. Der Umgang mit 3D Geodaten hat eigene Herausforderungen wie:

- Verarbeitung großer Datenmengen,
- spezielle Datenverarbeitung mit eigenen Werkzeugen und spezieller Expertise,
- eigene Datenmodelle und Standards,
- Visualisierung.

Anforderungen an das Speichern von 3D Geodaten sind:

- 3D Datentypen sind zu unterstützen. Wichtig dabei ist die korrekte und konsistente Nutzung der Höheninformation. Eine dreidimensionale Indizierung und Abfrageunterstützung sind notwendig. Dreidimensionale Koordinatensysteme müssen unterstützt werden.
- Fähigkeit zur Modellierung von 3D-Objekten muss gegeben sein. Punkte, Linien, Polygone mit Höheninformation ("z") müssen gespeichert werden. Oberflächen (surface), Körper (solid) und Punktwolken (pointcloud) müssen unterstützt werden.
- Unterstützung "höherer" Datenmodelle ist für eine effiziente Nutzung notwendig (z.B. CityGML, GeoJSON, etc).

Die Recherche im Rahmen von RISKMON ergab, dass derzeit ca. 25 Datenbanksysteme mit spatialen Erweiterungen zur Verfügung stehen. Es wurden drei Systeme – Oracle Spatial and Graph, PostGIS und H2GIS - ausgewählt und im Detail gegenübergestellt. Die Hauptkriterien für die Auswahl lagen in a) einer großen Verbreitung, b) einer stabilen Lauffähigkeit und c) der Möglichkeit nahezu unlimitiert große Datenmengen verarbeiten können.

Oracle Spatial and Graph

Oracle Spatial and Graph ist eine Komponente der Oracle-Datenbank. Die Erweiterung dient der Speicherung und Verwaltung von Geoinformationen. Über die Speicherung von Geokoordinaten hinaus unterstützt Oracle Spatial and Graph die Repräsentation von Graphen, die zur Analyse verwendet werden. Oracle Spatial und Graph enthält erweiterte Funktionen zur Verwaltung und Analyse von räumlichen Daten. Es unterstützt alle wichtigen räumlichen Datentypen und -modelle. Native Unterstützung für **GeoJSON**. Dies ist das Standardformat zum Lesen und Veröffentlichen von Geodaten.

GeoRaster speichert und verarbeitet georeferenzierte Rasterdaten, z. B. Satellitenbilder und gerasterte Daten. Es stellt eine leistungsfähige Rasteralgebra-Bibliothek zur Verfügung und unterstützt die Erstellung von virtuellen **Mosaiken**.

3D-Punktwolken und **LiDAR** werden für Enterprise 3D GIS- und Smart-City-Anwendungen verwendet. Die 3D-Unterstützung ist für Punktwolken- und **CityGML**-Workflows optimiert. Es ermöglicht die Produktion und Verwaltung von nahtlosen 3D-Punktwolkenmodellen von kleinen lokalen Gebieten bis zu großen Städten und Ländern.

Ein **Topologie-Datenmodell** wird von Kartierungsanwendungen, die ein hohes Maß an Datenintegrität erfordern, benötigt. Das auf dem Open Geospatial Consortium basierende **GeoSPARQL** wertet räumliche Daten in einem RDF-Graphen aus. Mittels in Tabellen definierte RDF-Ansichten können SPARQL-Abfragen für relationale Daten aktiviert werden.

PostGIS ist eine Erweiterung von PostgreSQL für die objektrelationale Datenbank, die geographische Objekte und Funktionen umfasst. PostgreSQL mit PostGIS bildet eine Geodatenbank, die in Geoinformationssysteme eingebunden werden kann.

H2GIS - Die H2 Database Engine ist ein in der Programmiersprache Java geschriebenes relationales Datenbankmanagementsystem. H2 ist als Open-Source-Software für die Java-Plattform verfügbar. Bei der Entwicklung des Systems steht ein schlanker Aufbau sowie eine im Vergleich zu anderen Datenbanksystemen hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit im Vordergrund. H2GIS ist die räumliche Erweiterung der H2-Datenbank-Engine. Es bietet Unterstützung für die Verwaltung räumlicher Funktionen und Operationen, den Funktionen für das Simple Features for SQL (SFSQL) des Open Geospatial Consortium (OGC) und zusätzlichen räumlichen Funktionen.

Vergleich ausgewählter geospatialer Datenbanksysteme

Um eine bessere Übersicht für die Auswahl eines geeigneten Datenbankmanagementsystems zu bekommen, wurde die folgende tabellarische Gegenüberstellung angefertigt. Es wurden vorwiegend solche Funktionen in die Darstellung aufgenommen, von denen angenommen wird, dass diese für ein Gesamtsystem gemäß den Anforderungen wesentliche Funktionen übernehmen.

Tabelle 37: Vergleich der Datenbank Funktionen

Funktionen	Oracle Spatial and Graph	PostGIS	H2GIS
Abfragen:			
Abfrage attributiver & geographischer Info	x	x	x
Primärfilter	x	x (GiST)	
Sekundärfilter	x		
GeoSPARQL	x	(x) Marmotta	(beta) extension
Räumliche Indizierungsmechanismen:			
R-Tree	x		
R+-Tree	x		
Quadtree	x		
GiST (Generalized Search Tree)		x	x
GIN (Generalized Inverted Index)		x	
Octree	(x) extension		
Geometrietypen:			
Unterstützung für Basistypen: Point, Line String, Polygon	x	x	x
Unterstützung für erweiterte Typen: Arc Line-String, Arc Polygon, Compound Polygon, Compound Line String, Circles, Rectangles	x	(x)	(x)
3D Basis-Datentypen: 3D-Point, 3D-Line String, 3D-Polygon	x	x	x
Unterstützung für sonstige Typen:			
Oberflächen (Surface)	x	(x)	(x)
Körper (Solid)	x	(x) closed TIN	
Triangulated Irregular Network (TIN)	x	x	(x) 2D
GeoRaster (GEOTIFF, PNG, BMP, JPEG and TIFF with world file, ESRI ASCII)	x	(x) WKTRaster	(beta) WKTRaster
Virtuelle Mosaik	x		
3D-Punktwolken / LiDAR Massive Point Cloud	x	x (extension)	
Topologiedatenmodell	x	x	x (h2Network)

Tabelle 38: Datenbank Funktionen II

Features	Oracle Spatial and Graph	PostGIS	H2GIS
<i>Funktionen für die Abfrage von Geometrien in den Formaten:</i>			
WKT (Well-Known Text)	x	x	x
WKB (Well-Known Binary)	x	x	x
GML	x	x	
SVG	(x)	x	
KML	x	x	x
GeoJSON	x	x	x
x3d		x	
Shape	(x) Mapbuilder	x	x
CityGML	x		

Tabelle 39: Datenbank Funktionen III

Features	Oracle Spatial and Graph	PostGIS	H2GIS
Räumliche Funktionen (z.B. Berechnung von Flächen und Distanzen, Verschneidung, Berechnung von Pufferzonen etc.)	x	x	x
Räumliche Operatoren (z.B. Overlaps, Within, Contains etc.)	x	x	x
Funktionen für die Erstellung von Geometrien	x	x	x
Analyse von Vektordaten	x	x	x
Analyse von Rasterdaten	x	x (mit Erweiterung WKT Raster)	
Analyse von Punktwolken	x		

3.8.2 Visualisierung

Tabelle 40: Visualisierung

Anwendung	PointCloud	Rasterdaten	Geometriedaten
ESRI ArcGIS	x	x	x
Cesium	x	x	x
Autodesk RECAP	x	x	x
Bentley Pointtools Vion	x		x
Potree	x		x
Sketchfab			x

3.8.3 Prozessierung

Tabelle 41: Prozessierung

Funktionalität	FME	libLAS	GeoKettle
LiDAR Datenverarbeitung	x	x	
Rasterdatenverarbeitung	x		
Geometrieverarbeitung	x	x	x
Kostenpflichtig	x		
Koordinatentransformationen	x	x	
Ausschnitte aus den Daten extrahieren	x	x	x
TIN Bildung	x		
Mosaikbildung	x		
Daten aus verschiedenen Quellen verarbeiten	x		
Geometrische Operation	x		

3.9 Empfehlung und Integration IT - Bestandssysteme

3.9.1 Bestandssysteme der Betreiber (IST)

Die IT - Bestandssysteme der Netzbetreiber ÖBB und ASFINAG enthalten die Bestandsanlagen mit standardisierten stark abstrahierten Informationen (Bauwerk, Typ, Alter, Material, Abmessungen, Zustandsnoten etc.) meist in Listenform. Zudem gibt es eine umfassende Bestandsdokumentation mit Streckenplänen, GIS – Karten und funktionalen Graphen in denen Informationen aus den Bauwerksdatenbanken aggregiert darstellbar sind. Im Fall der ÖBB besteht zudem die Möglichkeit Daten von Laserscans (Punktwolken) der Strecke zu verarbeiten und mit Streckeninformationen (CAD, GIS) zu überlagern. Ausgehend von dem in Kap. 2.1 dargestellten Bausteinen des Asset Management liegt der Schwerpunkt der bestehenden Systeme in der Datenhaltung der Bestandsanlagen sowie der Zustandserfassung. Weiters bestehen für ausgewählte Anlagen (Oberbau) Systemen zur Zustandsprognose und Maßnahmenplanung. Im Wesentlichen sind die Prozesse des Asset Management über die Bestandsdaten, Zustandserfassung und Auswertung hinaus weitgehend empirisch strukturiert bzw. erfolgen überwiegend manuell.²⁹

Wie noch gezeigt wird, liegt der wesentliche Vorteil einer Digitalisierung insbesondere in der quantitativen, hochgenauen Erfassung und Auswertung von Zustands- und Bestandsdaten. Bei entsprechender Verarbeitung bieten diese eine wesentlich bessere Grundlage für die Zustandsprognose, Risikobewertung und Maßnahmenplanung. Investitionen in bessere Eingangsdaten machen generell vor allem dann Sinn, wenn diese auch zu besseren Entscheidungen im Lebenszyklus führen. Dementsprechend ist zu empfehlen, die Bestandssysteme der Betreiber in Hinblick auf eine durchgehende Prozessierung im Sinn des Asset Management Zyklus auszuweiten. Werden die Bestandssysteme dagegen nur in Richtung Datenhaltung und Visualisierung der aus RISKMON bzw. vergleichbaren Projekten resultierenden dreidimensionalen Daten mit zeitlicher Änderung ausgelegt, so wird der Mehrwert für die Betreiber überschaubar bleiben.

Das Forschungsprojekt RISKMON konzentriert sich in auf die hochgenaue Erfassung unter Einsatz mobiler Sensorik mittels Hochleistungsdrohnen.– aus diesen sind bei Bedarf Orthofotos, Höhenmodelle, Schnitte etc. extrahierbar d.h. es handelt sich um texturierte 3D –Modelle mit Veränderung (4D). Für die Bearbeitung braucht es eine Strukturierung der Daten bzw. der 3D – Objekte mit Bounding – Boxes je Element und logischer Objektstruktur sowie mehreren Texturen (Bild, Thermografie) und entsprechende Dateiformat (z.B. .obj oder .fbx – Format – für Muren reicht TIN, GEOTIFF). Eine sinnvolle Abgrenzung zu Dienstleistern wäre die Lieferung des 3D-Datensatzes in einer definierten Boundingbox bzw. zusätzliche Schadenserkenung und Beschreibung mit einem geeigneten Viewer (z.B. durch ZT – Büros).

Aus Erfassungen können in weiterer Folge manuell oder automatisiert Schadensinformationen, Noten sowie Kommentare in Listenform analog zu den Bestandssystemen extrahiert werden. Tatsächlich zeigt die Recherche, dass einfache Schadenserkenungsalgorithmen grundsätzlich verfügbar sind, die Erkennungsrate weist aber noch erhebliches Optimierungspotenzial auf. Für den Straßenoberbau bzw. auch sukzessive für den Bahnoberbau gibt es weltweit eine kleine Anzahl an Anbietern die leistungsfähige Schadenserkenungsalgorithmen auf Basis von hochauflösenden Scans anbieten. Die Bestandssysteme der Betreiber sowie die am Markt verfügbaren Systeme des Asset Management sind aber nur begrenzt für die Verarbeitung dieser Informationen geeignet. Aufgrund des Schwerpunkts von RISKMON auf der Bestands- und Zustandserfassung werden die Systeme der Betreiber in der Folge vor allem aus dieser Hinsicht evaluiert.

²⁹ vgl. *HOFFMANN, M. et al. (2012); HOFFMANN, M. (2018a)*

Beschreibung der IT-Zielsysteme der ASFINAG:

In der ASFINAG gibt es für die erfassten Daten aus RISKMON mit dem IMT (Infrastruktur Management Tool), dem GIS (Geographische Informationssystem) und DOXIS (Dokumentenarchiv) drei wesentliche Zielsysteme. Das System IMT hat im Kern einen Microsoft SQL-Server auf den die Applikationen zugreifen. Von Vorteil ist, dass das IMT System von der ASFINAG angepasst werden kann. Seitens ASFINAG werden dabei Lösungen bevorzugt, welche direkt an die Datenbank angebunden werden können. SharePoint Listen kommen ebenfalls zum Einsatz. Die Identifikation der Objekte in IMT erfolgt anhand eines „natürlichen Schlüssels“ und einer GUID (Global Unique Identifier). Wünschenswert eine diesbezügliche Referenzierung bereits bei der Erhebung, um im Anschluss eine reibungslose Integration der Daten zu gewährleisten. Das System SOTRA (Sondertransporte) greift ebenfalls auf die Basisdaten von IMT zu (Abbildung 48).

Das GIS System besteht im Wesentlichen auf ArcGIS von ESRI. Das Werkzeug FME von Safe ist ebenfalls bei ASFINAG im Einsatz. Im Geodatenbereich kommt ebenfalls Produkt Global Mapper von Blue Marble Geographics zum Einsatz. Das GIS ist mit IMT verlinkt. Im GIS sind vorrangig Position und Geometrie des Anlagenbestandes vorgehalten. Vermessungspläne werden derzeit in DOXIS und GIS vorgehalten. Eine direkte Anbindung an BAV (Betriebliche-Aufgaben-Verwaltung) wird nicht angestrebt. Für die Arbeitsplanung ist auch eine mobile App im Einsatz. Weiters wurde in den gemeinsamen Analysen mit der ASFINAG festgestellt, dass BIM ebenfalls ein aktuelles Thema ist, welches als mögliches zukünftiges Zielsystem betrachtet werden sollte. In diesem Bereich könnte zukünftig REVIT von Autodesk in Frage kommen. Für eine diesbezügliche Integration der Erhebungsdaten in ein BIM sind jedoch noch wesentliche Fragen zu klären. In dieser Hinsicht wurden von der ASFINAG aber bereits Pilotprojekte vergeben, um ausgewählte Fragen der Dokumentation und Integration von Zustands- und Bestandsdaten im BIM zu klären.

Mit Ausnahme von diesen Pilotanwendungen werden sind allgemeine Werkzeuge bzw. Viewer für 3D Daten (z.B. Punktwolken) derzeit noch nicht bei der ASFINAG im Einsatz. Es besteht jedoch entsprechender Bedarf nicht zuletzt für die Visualisierung der Ergebnisse von Tunnelscans sowie deren weiterer Verarbeitung im Asset Management (laufendes Forschungsprojekt). Terrain-daten wie z.B. Höhenschichtlinien z.B. von Lawinen und Muren im Bereich Naturgefahren können bereits jetzt im GIS der ASFINAG als Layer aufgenommen werden. Für die dreidimensionale Visualisierung und Analyse hochgenauer Ergebnisdaten in diesem Bereich besteht jedoch ebenfalls Handlungsbedarf. Was dagegen bereits jetzt möglich wäre, ist die Integration von Streckenabschnitten und Bauwerken, für die hochgenaue Erhebungen vorliegen z.B. als Übersichts-Layer im GIS mit Datenbankanbindung zu den Erhebungs- und Ergebnisdaten. Als Übertragungsformat für den Demonstrator könnte hierfür das .shp Format verwendet werden.

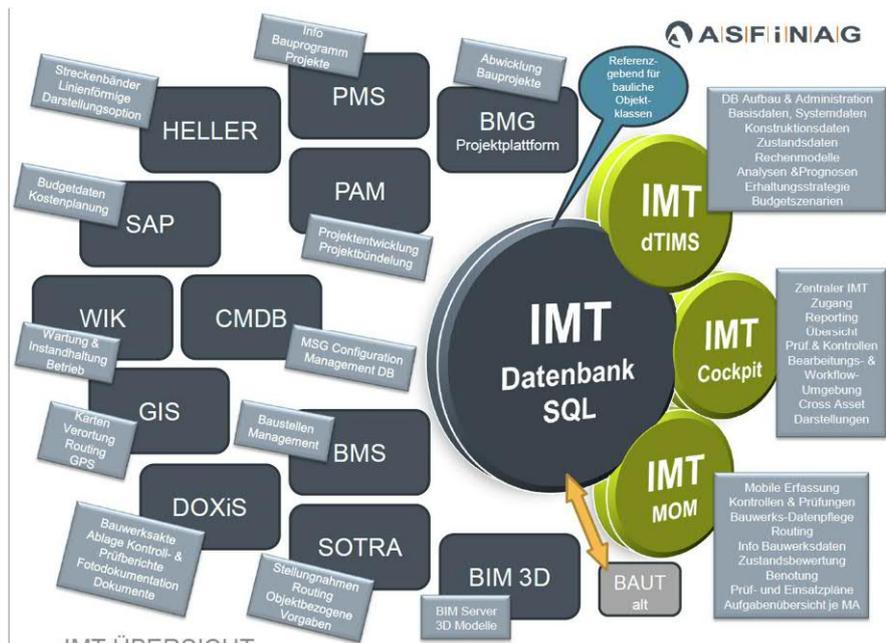


Abbildung 48: ASFINAG IST-Bestandssystem

Beschreibung der Zielsysteme bei ÖBB:

Bei den ÖBB werden im GIS Bereich vorrangig ESRI bzw. WebOffice Lösungen verwendet. Eine Klärung, ob von diesem Anbieter Lösungen zur Integration von Orthoplanen und hochauflösenden Ansichten existieren bzw. Fragen zu allfälligen Lizenzen werden durch die ÖBB selbst geklärt. Dasselbe gilt für die Frage nach einem zentralen System für die Archivierung und Visualisierung von Livefeeds (Video, Audio) sowie generell für das Abspielen von Video- und Audiofiles. Die Fragen der Schaffung eines zentralen Systems für hochauflösende Bilder (Speichern, Raster, Vorschaubilder, etc.) ist ebenfalls Teil sich in Ausarbeitung befindlichen Digitalisierungsstrategie in den ÖBB. Unmittelbar möglich erscheint dagegen eine Integration für den Use-Case „Sensorausbringung“ im GIS als Layer mit aggregierten Sensorwerten, die periodisch (z.B. täglich) aktualisiert werden. Dieser Layer könnte lt. ÖBB auch mit einem „timeslider“ versehen werden, um eine zeitbezogene Filterung der dargestellten Werte zu ermöglichen.

In Bezug auf Ergebnisdaten im Bereich Naturgefahren besteht derzeit aus Sicht der ÖBB kein Bedarf an zusätzlichen IT – Systemen, da alle wesentlichen Informationen im GIS (Höhenschichtenlinien, Differenzpläne etc.) bereits jetzt weitgehend darstellbar sind. Zusätzliche Infrarot-Orthofotos oder 2,5D Höhenpläne könnte ebenfalls als Layer (z.B. WMS) im ÖBB GIS inventarisiert und visualisiert werden. Die Integration (evtl. in Form einer Verlinkung in das zukünftige System) in den Systemen Ereignisdokumentation und Gefahrenpotentiale wäre dagegen wünschenswert und sollte auf Machbarkeit untersucht werden. Für den Bereich der Schutzbauten wäre zudem eine Unterstützung für die Zustandsbewertung mit GIS – Anbindung wünschenswert. Dasselbe gilt auch für Zusatzinformationen aus der Auswertung der Streckenerfassung, wo die Möglichkeiten jedoch bereits weiter fortgeschritten sind. Ein Gesamtüberblick über die IT – Service-Landkarte der ÖBB-Infrastruktur AG findet sich in Abbildung 49. Eine weitergehende Analyse und Strategie für die Entwicklung dieser Systeme ist jedoch ausdrücklich nicht Gegenstand von RISKMON.

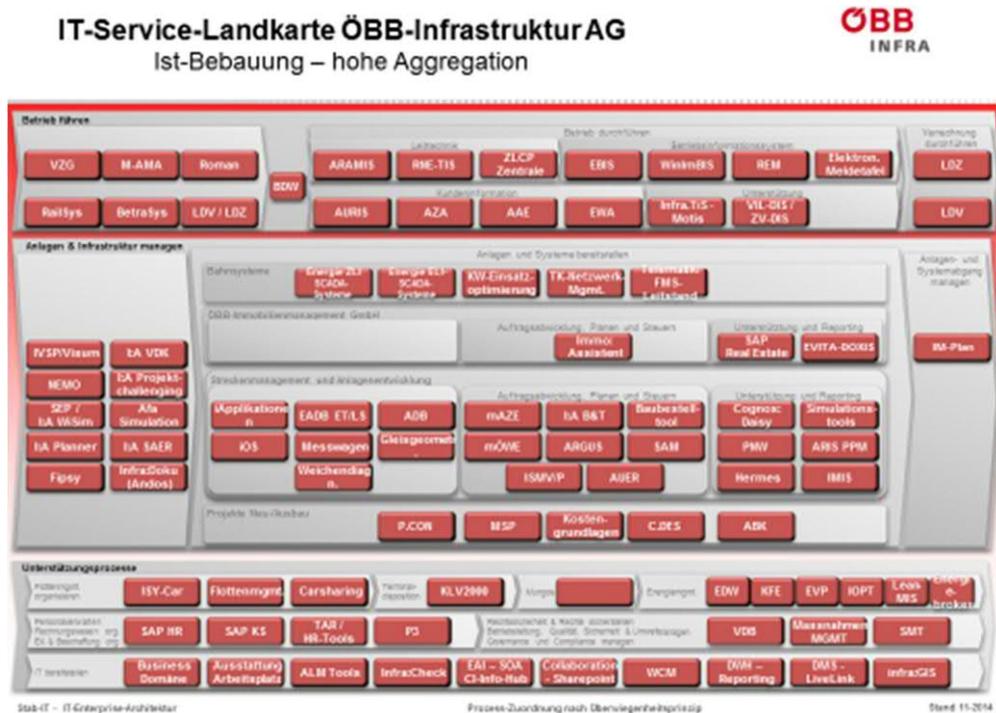


Abbildung 49: ÖBB Infrastruktur AG - IST-Bestandssystem

3.9.2 Weiterentwicklung Bestandsysteme

Vision generelles Konzept und Integration:

Allgemein beinhaltet ein Asset Management System auf Basis von Lebenszykluskostenansätzen die folgenden Bausteine, die in zyklische Abfolge durchlaufen werden:

1. Bestands- und Zustandserfassung (Schwerpunkt RISKMON)
2. Prognose von Zustand und Zuverlässigkeit
3. SWOT - Bewertung und Modellierung,
4. Optimierung von Strategien und Maßnahmen (Mehrwert Daten RISKMON)
5. Budget, Prioritäten und Ressourcenallokation
6. Umsetzung und Überwachung Bauprogramm
7. Ergebnisprüfung und Übernahme
8. Systematisches Benchmarking und Feedback:

Für die Umsetzung empfiehlt sich eine Gliederung des Knoten-Kanten-Modells der funktionalen Netzgraphen in ein System kurzer Abschnitte (Abbildung 50). Diese können topologisch als funktionales System von redundanten und nicht-redundanten Elementen aufgefasst werden. Diese Elemente beinhalten in der Regel einen Abschnitt Richtungsfahrbahn bestehend aus mehreren Fahrspuren bzw. einem oder mehreren Gleissträngen. Weiters kann ein Abschnitt/Element auch aus einem Tunnel oder einem Brückentragwerk bestehen, dass wiederum ein System von funktional zusammenhängenden Subelementen ist. Mit diesem Netzmodell kann der aggregierte Zustand (Noten) auf Basis der Erfassung bzw. mittels Prognosen zu jedem beliebigen Zeitpunkt dargestellt werden. Weiters ist es möglich den Zustand der Subelemente (ebenfalls aus Standarderfassung bekannt) in Listenform bzw. visualisiert auf einem 3D – Modell des Bauwerks darzustellen. Hier ist auch die Schnittstelle zu RISKMON bzw. einer quantitativen Zustandserfassung auf den einzelnen Subelementen bzw. Bauteilen mit manueller oder automatisierter Detektion der relevanten Schäden. In Ergänzung zu einer (subjektiven) Benotung würde dies erheblich bessere Prognosen sowie Optimierung von Maßnahmen im Lebenszyklus erlauben (HOFFMANN, M. 2018a).

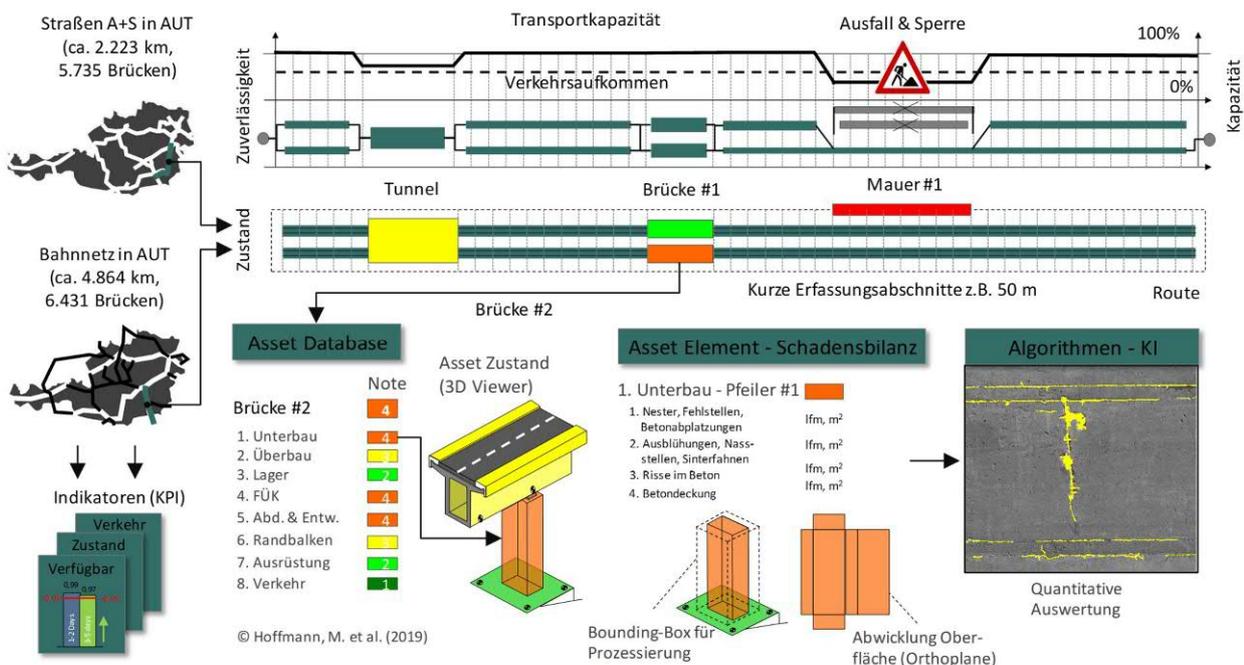


Abbildung 50: Generelles Konzept für die Weiterentwicklung des Asset Management mit Integration hochauflösender Erfassungsdaten in das Asset Management in RISKMON

Automatisierte Schadensdetektion:

Ein effizienter Einsatz von Hochleistungsdrohnen und Sensorik im Bereich der Verkehrsinfrastruktur bzw. generell jeder modernen Zustandserfassung erfordert den Einsatz geeigneter Algorithmen mit hoher Detektionsrate (>90%) für alle relevanten Schäden (Kap. 2.2). Zur Minimierung des manuellen Arbeitsaufwandes in Validierung und Kontrolle der Ergebnisse empfiehlt sich der Aufbau und Betrieb von Schadensdatenbanken sowie eine Toolbox, welche neben den Algorithmen auch die Möglichkeit einer unabhängigen Validierung der Detektionsraten erlaubt. Welche Methodik für die Detektion jeweils geeignet ist, hängt maßgeblich vom eingesetzten Sensor sowie den zu detektierenden Schäden ab. Die Entwicklung geeigneter Algorithmen mit hoher Prozessierungskapazität und Detektionsrate ist trotz der rasanten technischen Entwicklung in diesem Feld meist mit erheblichem Aufwand verbunden. Der Vorteil einer entsprechenden Toolbox liegt neben der Validierung der Detektionsraten in der Möglichkeit einer sukzessiven Ergänzung durch neue Algorithmen sowie in deren Kombination (Metaalgorithmen, Ensemble Learning).

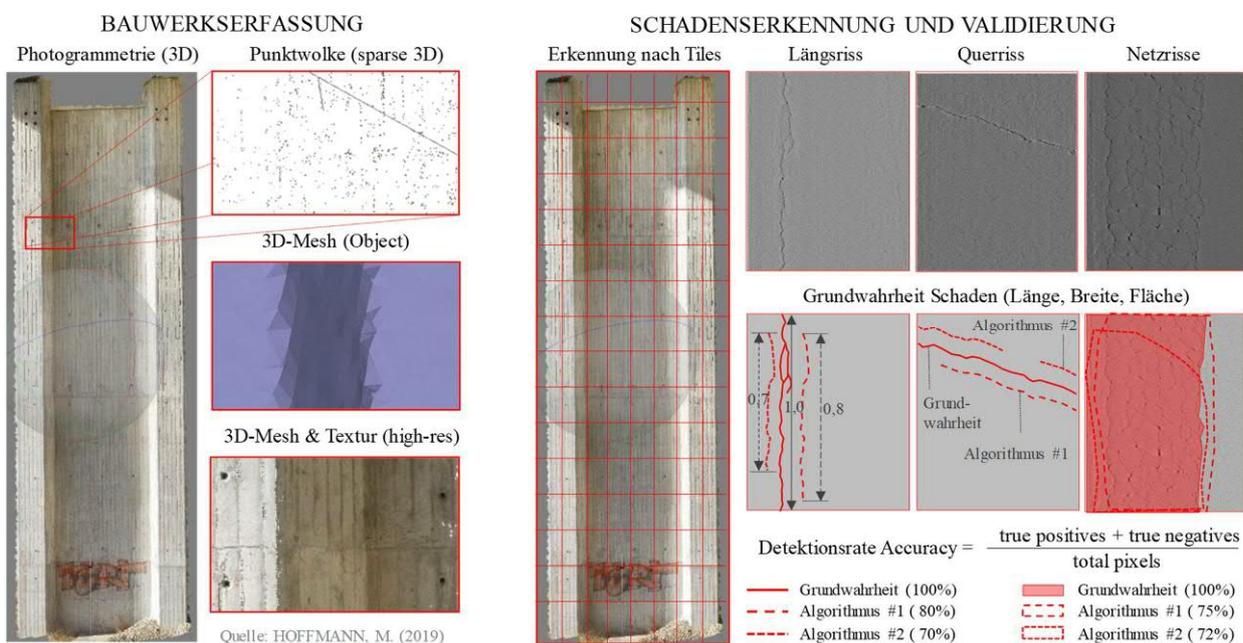


Abbildung 51: Generelles Konzept für die erforderlichen Eingangsdaten sowie die Schadenserkennung und Validierung der Detektionsraten mit Algorithmen in RISKMON

Die Entwicklung von Algorithmen für die Klassifizierung und Schadensdetektion ist ein stark wachsendes Forschungsfeld mit riesigem Potenzial für Infrastrukturbetreiber. Während insbesondere in China, Japan und Amerika erhebliche Summen in die diesbezügliche Forschung investiert werden, steht der deutschsprachige Raum hier noch eher am Anfang. Die auf Basis der Literaturrecherche dargestellte Übersicht in Abbildung 52 zeigt den Ablauf der Prozessierung sowie einen Querschnitt der verwendeten Algorithmen und Methoden. Die Validierung der Detektionsraten zeigt, dass die Zielsetzung von >90% Detektionsrate bei entsprechendem Aufwand durchaus erreichbar ist. Sind mehrere unterschiedliche Schäden vorhanden, so zeigt sich, dass die angeführten Detektionsraten zum Teil so stark absinken, dass die Ergebnisse nicht mehr verwendbar sind. So hat ein 10-Mann Team rund 18 Monate in der Entwicklung von CrackNet II (Deep Learning) gearbeitet, um eine Rissdetektion auf Basis von Nahscans mit einer Detektionsrate zwischen 90-95% trotz anderer Schäden zu erreichen.³⁰

³⁰ vgl. MOHAN, A. et al. (2017); TSAI, Y. & Chatterjee, A. (2017); ZHANG, A. et al. (2018);



Überblick Algorithmen Bildverarbeitung (MOHAN, A. et al. 2017)

Image processing techniques	Papers
Morphological approach	[9,20,36,42,40]
Digital image correlation	[6,10,43,45]
Randomized hough transform	[1,23]
Ultrasonic pulse velocity technique	[24,43]
Wavelet transform	[11,23,38,46]
Median filtering	[23,48]
Gabor filtering	[49]
Otsu's method	[22,49]
Statistical approach	[19,20]
Threshold method	[6,47,48]
Supapixel algorithm	[26]
Data fusion filtering	[8,44]
Reconstruction technique	[3,8,42]
Photogrammatic technique	[4,8]
PA imaging	[6,11]
Percolation	[27,40]
Centroid method	[34]
Delaying and summing algorithm	[35]
GLCM texture analysis	[38,41]
Dijkstra's algorithm	[49]
Skeletonization techniques	[5,36]

Erreichte Detektionsraten (MOHAN, A. et al. 2017)

Accuracy level	Papers
Below 70%	[9,10,24,16]
70-75%	[41]
80-85%	[46,49,50]
85-90%	[8,39]
90-95%	[2,11,17,25,30,37,38,48]
Above 95%	[12,21,32,40]

- Die Detektionsrate hängt wesentlich von Datenqualität/Auflösung und Algorithmus ab – für Validierung/Prognosen > 90% erreichbar
- Die Entwicklung der Algorithmen erfolgt häufig durch einzelne Forscher oder größere Teams – in Abschlussarbeit, Wettbewerb, Projekt
- CrackNet bzw. CrackNet II (deep learning) wurden durch 10-Mann Team in +18 Monaten entwickelt (Nahscan, >90% Detektionsrate)

3D – NahScan (1 mm
Auflösung) basierend auf
PaveVision3Dsystem
(ZHANG, A. et al. 2018)

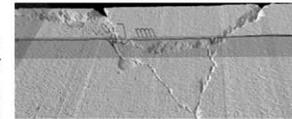
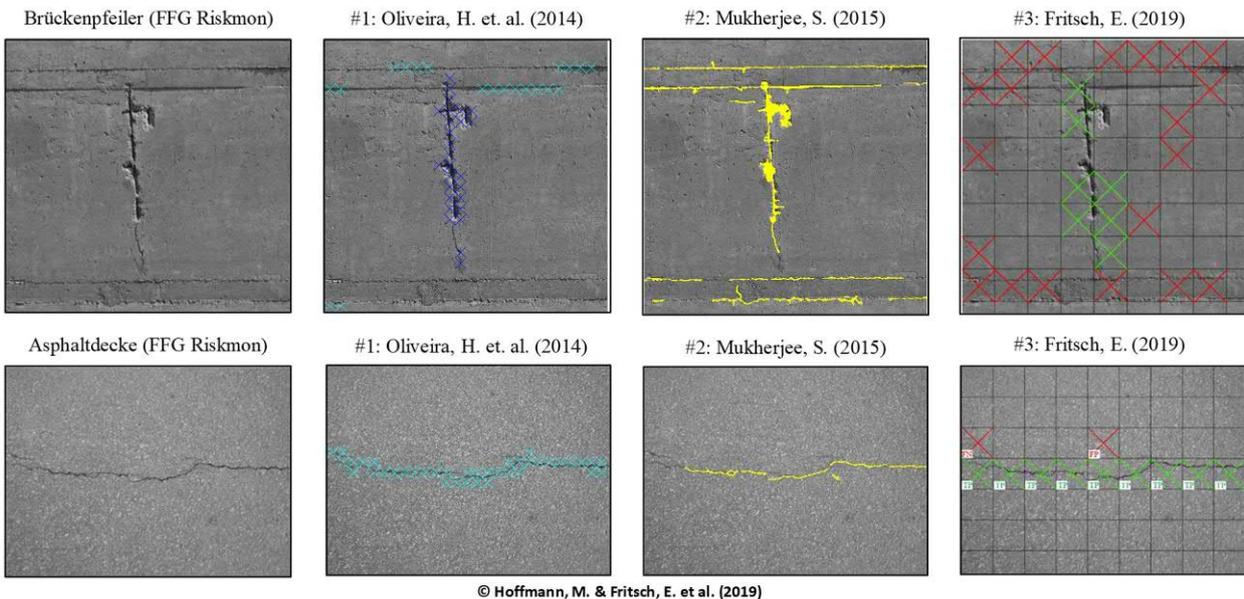


Abbildung 52: Überblick verwendete Algorithmen in der Bildverarbeitung bzw. Schadensdetektion mit erreichten Detektionsraten für Risse mit Quellenverweisen (MOHAN, A. et al. 2017)

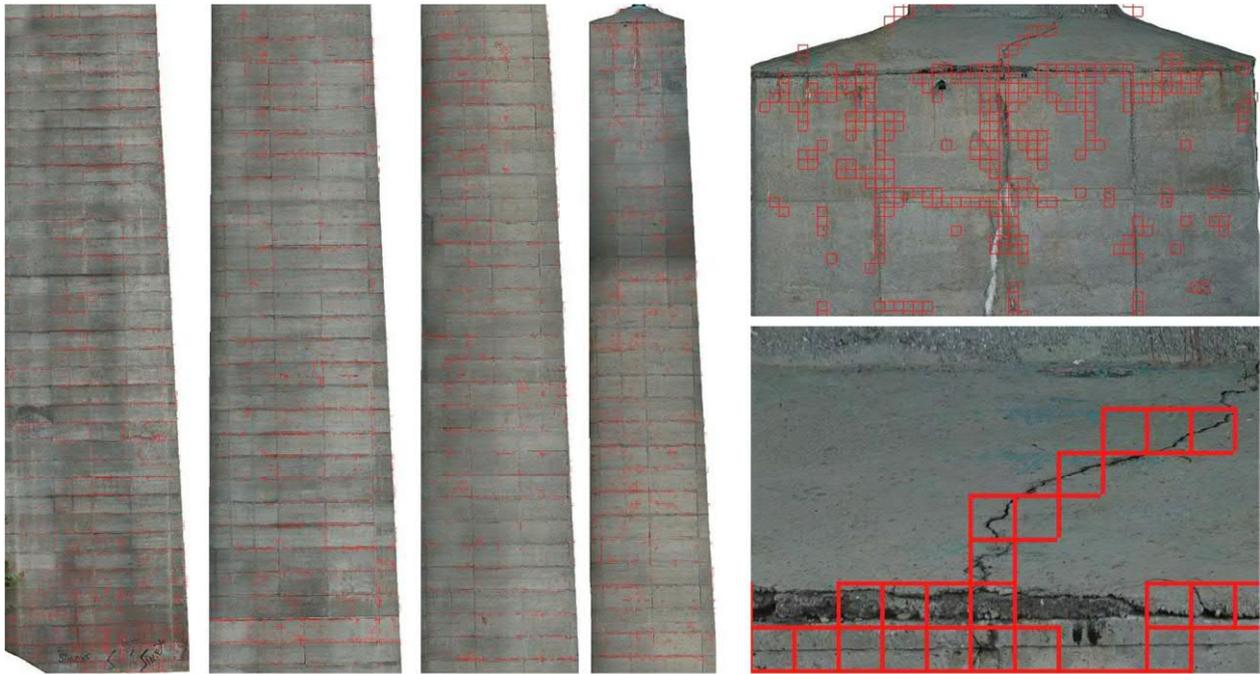
Neben einer umfangreichen Literaturrecherche zu Entwicklungsstand und Methoden der Detektionsalgorithmen wurden in RISKMON auch ausgewählte Anwendungsfälle analysiert. So zeigt Abbildung 52 zwei ausgewählte Bildausschnitte (Beton, Asphalt) sowie deren Analyse mit ausgewählten Algorithmen bzw. einem adaptierten Ansatz in Matlab.³¹ Wie Abbildung 53 zeigt, lassen sich diese Algorithmen auch auf die Analyse großer Datenmengen effizient anwenden. In Bezug auf eine höhere Detektionsrate sowie die Erfassung anderer Schadensmerkmale besteht aber noch erheblicher Forschungsbedarf.



© Hoffmann, M. & Fritsch, E. et al. (2019)

Abbildung 53: Ergebnisse der verwendeten/entwickelten Algorithmen zur Detektion von Risschäden am Beispiel von Bildausschnitten eines Betonpfeilers sowie einer Asphaltdecke in RISKMON

³¹ Vgl. OLIVEIRA, H. et al. (2014); MUKHERJEE, S. (2015); FRITSCH, E. (2019)



© Fritsch, E. et al. (2019)

Abbildung 54: Ergebnisse der Analyse großer Datenmengen in der Detektion von Risschäden am Beispiel eines gesamten Brückenpfeilers der ASFINAG aus Beton in RISKMON

IT – Konzept für ÖBB und ASFINAG in RISKMON:

Im Zuge des Forschungsprojekts RISKMON erfolgte eine umfassende Abstimmung und Analyse mit den Unternehmen ASFINAG und ÖBB, um ein IT-Konzept für die Integration der zu erfassenden Daten in einem zukünftigen Zielsystem erstellen zu können. Aufbauend auf die erarbeiteten konzeptiven Grundlagen sowie die Bestandssysteme der Betreiber erfolgte dieser Arbeitsschritt in enger Abstimmung mit den Experten der beiden Unternehmen. Neben der Identifikation und Konzeption möglicher künftiger Zielsysteme wurden dabei die technischen Möglichkeiten für eine Integration der Daten aus der Digitalisierung generell bzw. spezifisch für die einzelnen Prozessierungsschritte in RISKMON aufgezeigt. Die Beschreibung gemäß diesen Schritten von der Datenaufnahme bis zur Abgabe findet sich in Abbildung 55 bzw. Abbildung 56.



Abbildung 55: ASFINAG – Empfehlung Bestandssysteme

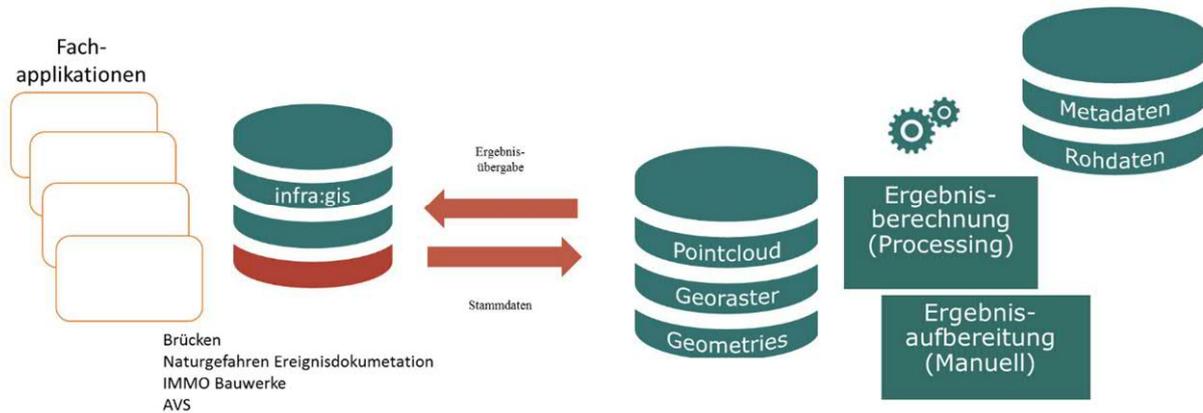


Abbildung 56: ÖBB – Empfehlung Bestandssysteme

Anforderungsdefinition: Für Befliegungen existiert bei ASFINAG bereits ein Leistungsverzeichnis für die erforderlichen Datenformate. Bei den ÖBB existieren ebenfalls entsprechende Vorgaben. Dieses wurde für das Projekt RISKMON zur Verfügung gestellt.

Erhebung: Daten die direkt während der Erhebung erstellt werden – sogenannte Rohdaten – sind in die zuvor beschriebenen Datenformate zu bringen, um dann in den Unternehmen integriert werden zu können. Sie bilden einen Schatz und sind für spätere Auswertungen vorzuhalten.

Anlieferung: Um die aufgenommenen Daten in die Systeme einzubringen ist die Verwendung von Standarddatenformaten gewünscht. Lieferungen mit Metadaten nach ISO-19115 wurden mit den Unternehmen ASFINAG und ÖBB besprochen und befürwortet und werden daher im Detailkonzept weiterverfolgt werden.

Speicherung: Aufgrund ihres Umfangs sollen Bilddateien nicht direkt in der Datenbank gespeichert werden. Ein Konzept für einen „Bildspeicher“ z.B. ein „Foto-Server“ wäre für ÖBB und ASFINAG wünschenswert. Zur Speicherung der Erhebungsdaten (Rohdaten) während der Dauer des Forschungsprojekts wurde der Wunsch geäußert diese bei F&E zu hosten.

Prozessierung: Für die Datenübermittlung bzw. die Ergebnisse wurden neben den Standardformaten insbesondere zwei Arten von Formaten gewünscht: rein „lesbare“ z.B. pdf, etc. und „bearbeitbare“ .dwg, etc. die dann den „Prüfern“ oder „Dritten“ zur Verfügung gestellt werden können

Abgabe & Visualisierung: Die gespeicherten Erhebungsdaten (Rohdaten) sowie die Ergebnisdaten aus der Prozessierung in RISKMON können samt Metadaten über eine Benutzeroberfläche heruntergeladen werden. Weiters werden Schnittstellen zur Verfügung gestellt, mit denen diese Daten aus Drittsystemen abgefragt werden können.

Die Erhebungsdaten (LiDAR, Orthofotos und Geometrie Daten) können über einen im Rahmen der RISKMON Projekt erstellten Viewer 3D Viewer betrachtet werden. Zusätzliche können mittels 3D Viewer die Ergebnisse der Prozessierung visualisiert werden. Eine Verknüpfung mit den Bestandsobjekten wird gewährleistet (Abbildung 57).

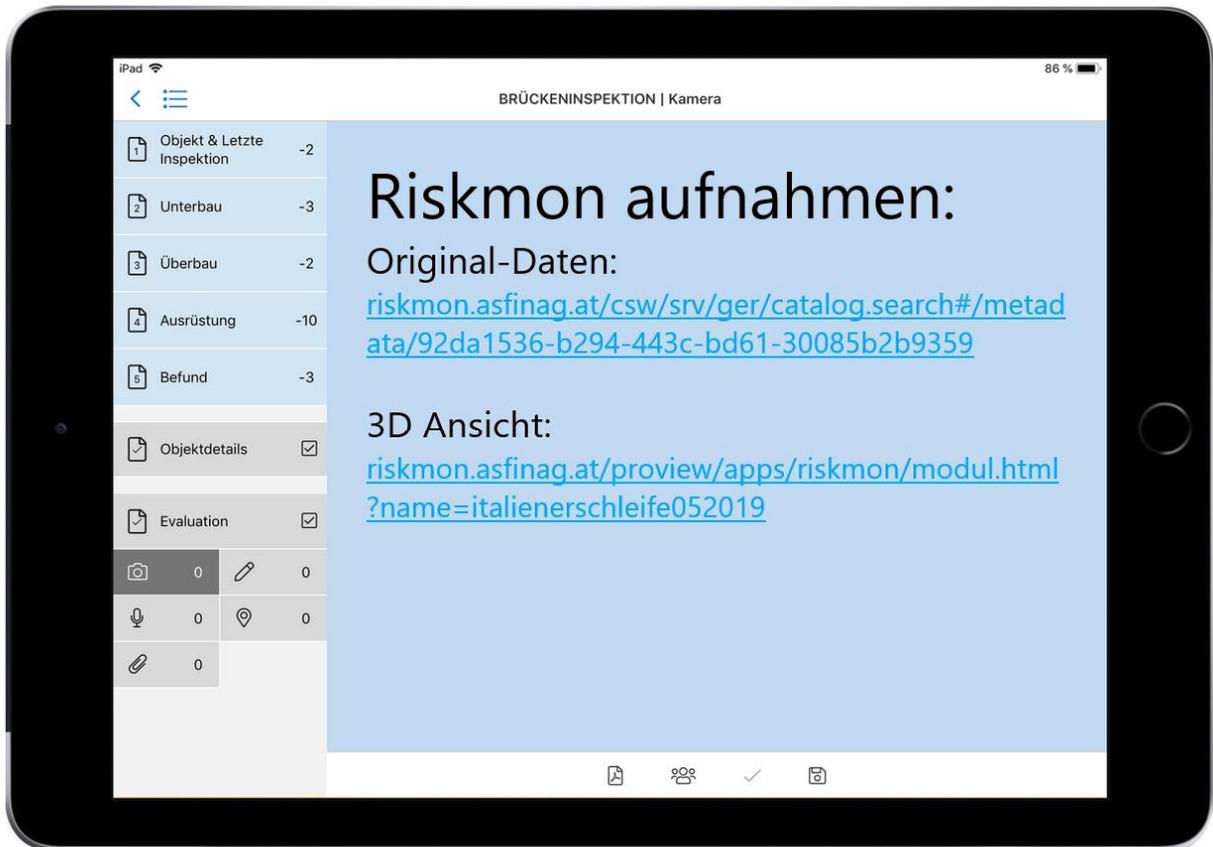


Abbildung 57: Konzipiertes System für den Zugang zu Ergebnisdaten aus RISKMON

4 Laborversuche und Kalibration

4.1 Versuchskonzeption

Die Verwendung von mobiler Sensorik bzw. UAV in der Aufklärung und Zustandserfassung der Verkehrsinfrastruktur hat sich in den letzten 10 Jahren ausgehend von militärischen bzw. Dual-use Anwendungen rasant entwickelt. Dasselbe gilt für die eingesetzte Sensorik (Foto, Video, Lidar, Thermo, Multispektral etc.) die sich in Bezug auf Auflösung, Gewicht und Auswertung (Software) sehr dynamisch entwickelt. Neben einer Marktbereinigung ist daher zu erwarten, dass innerhalb der nächsten Jahre die Entwicklung weiter vorangeht und die Anwendungen zunehmend anspruchsvoller werden. Wesentliche Voraussetzung dafür sind entsprechende Anwendungen und Algorithmen in Datenverarbeitung und Analyse sowie Überprüfung der Ergebnisse. Die zusätzlichen Laborversuche am BOKU – IKI stellen eine Erweiterung des ursprünglichen Forschungsrahmens dar, um die Einsatzmöglichkeiten und Grenzen zerstörungsfreier Prüfmethode mittels mobiler Sensorik auf eine objektive Basis zu stellen.

In der Erfassung von Schäden an Bauwerken mittels verschiedener Sensoren (Fotogrammetrie, Laserscan, Georadar, Hyperspektralkamera, Gassensoren etc.) ist es wichtig zu wissen, welche Art von Schäden nach Ausmaß und Schwere zweifelsfrei bestimmbar sind. In den Laborversuchen mittels ausgewählter Sensorik wurden anhand von speziellen Testkörpern die Einsatzgrenzen und Möglichkeiten überprüft. Für die Versuche wurden Sensoren verwendet, die bereits erfolgreich in der Befliegung und Erfassung von Bauwerken mit UAS angewendet werden. Zusätzlich wurden Sensoren getestet, deren Einsatz sich hinsichtlich der mobilen Schadenserhebung an Bauwerken noch in der Forschungsphase befinden bzw. in diesem Bereich noch nicht eingesetzt wurden. Für alle Anwendungen werden die Grenzen zur zerstörungsfreien Aufnahme aufgezeigt definierter bzw. bekannter Schäden ermittelt.

Bei den Befliegungen im Rahmen der Arbeitspakete von RISKMON werden vor allem Anwendungen zur Oberflächenaufnahme eingesetzt (Fotogrammetrie und Laserscan). Diese Aufnahmeverfahren ermöglichen hochauflösende Bilder der Struktur sowie die Erkennung von Schäden, die mit freiem Auge erkennbar sind (z.B. Risse, Abplatzungen, freiliegende Bewehrung, Korrosion). Neben der Frage nach der erforderlichen Auflösung, des Aufnahmeabstandes und anderer Parameter für eine zweifelsfreie Erkennung geht es in den Laborversuchen um die Erfassung von Schäden, die nicht mit freiem Auge bzw. den o.a. Sensoren erkennbar sind. Mit den zusätzlich eingesetzten Sensoren in den Laborversuchen wurde überprüft, inwieweit die für die Tragfähigkeit, Funktion und Sicherheit wesentlichen Schäden wie Hohlstellen und Feuchtigkeit im Beton, die Lage der Bewehrung, aber auch Chlorideintritt und Karbonatisierung bestimmbar sind.

Die für Laborversuche hergestellten Testkörper wurden mit typischen unregelmäßig verteilten, klar definierten Schäden versehen, welche in den Tests über die eingesetzten Sensoren detektiert wurden. Da der überwiegende Anteil der (Brücken)Bauwerke aus Stahlbeton besteht, wurden neun Betonkörper mit den Abmessungen 0,6 m x 0,6 m als Testkörper verwendet (Abbildung 58). Die Betonkörper enthielten Hohlräume mit verschiedenen Durchmessern und Tiefenlagen, Delamination in verschiedenen Tiefen und Ausmaß sowie korrodierende Bewehrung (Abbildung 59). Mit jedem Sensor wurden mehrere Erfassungsdurchläufe gefahren, in denen die einzelnen Testkörper mit unterschiedlichen Abständen vom Sensor (zwischen 0,0 m bis ca. 10,0 m je nach Sensor) aufgenommen wurden. In weiteren Durchgängen wurden die Testkörper unter Bedingungen wie Verschattung, erhöhter Umgebungstemperatur, Erwärmung, Befeuchtung der Hohlräume und Verschmutzung der Oberfläche untersucht, um die Grenzen der Schadenserfassung unter realistischen Bedingungen zu testen.

Wesentliche Grundlage in der Konzeption des Versuchskörpers sowie der Auswahl der Sensoren war eine eingehende Analyse der wichtigsten Schäden sowie der Möglichkeiten ihrer Feststellung in der Literatur. Dabei hat sich gezeigt, dass sich viele Anwendungen und Sensoren in Bezug auf Bauwerksprüfungen noch im Forschungsstadium bzw. im Stadium von Prototypen befinden und weitgehend ohne definierte Standards eingesetzt werden. Umso wesentlicher ist eine systematische Auseinandersetzung mit dem aktuellen Wissensstand über die Einsatzmöglichkeiten der verfügbaren Sensoren und eine Beschreibung ihrer Funktionsweise (vgl. Kap. 4.2). Zur Gewährleistung der Nachvollziehbarkeit der Vorgehensweise und Ergebnisse erfolgte eine detaillierte Beschreibung der Versuchsdurchführung sowie der sich daraus ergebenden Erkenntnisse für deren Weiterentwicklung (Kap. 4.3). Am Ende der Laboruntersuchungen wurden die erhobenen Daten mittels geeigneter Software ausgewertet und aus dem Vergleich mit den bekannten Schäden auf die Detektionsgenauigkeit der Sensoren geschlossen (Kap. 4.4). Es wurden die Anwendungsgrenzen für den Einsatz der Sensoren im Zuge von Bauwerksinspektionen mit UAS im Kap. 4.5 aufgezeigt und Anwendungsempfehlungen gemäß Zeitplan entwickelt (Abbildung 60).

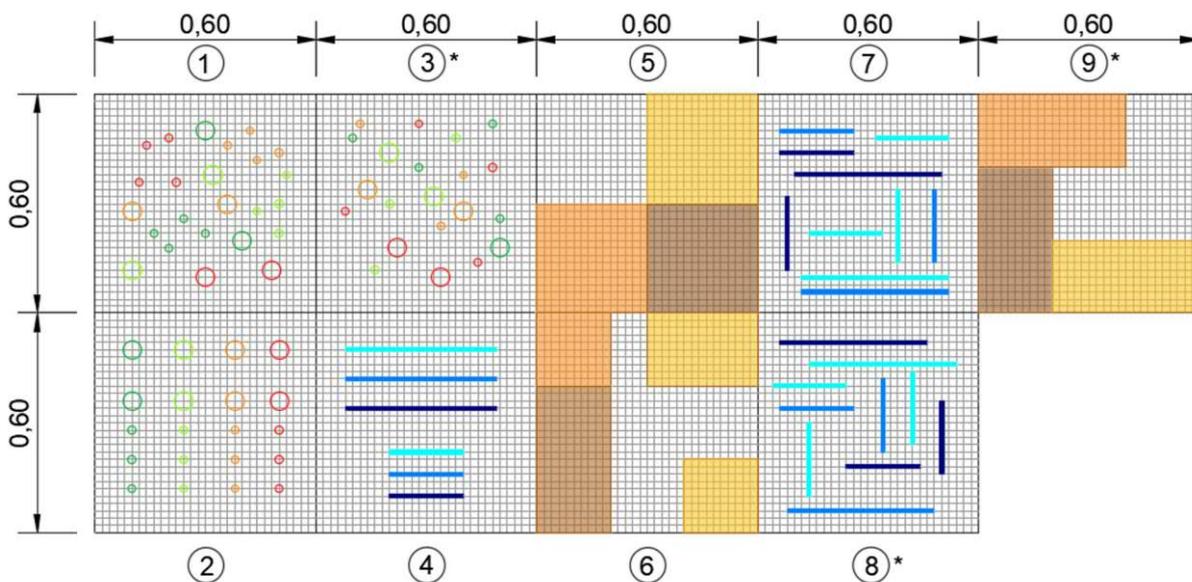


Abbildung 58: Grundriss (alle Abmessungen in Meter) des Testkörpers mit den verschiedenen Schäden (Felder 1, 2 und 3 weisen Hohlstellen auf. In den Feldern 5, 6, und 9 soll die Delamination nachgewiesen werden. Die Felder 4, 7 und 8 weisen korrodierende Bewehrungsstäbe auf. Feldnummern gekennzeichnet mit „*“ bedeuten „Felder mit schlechter Nachbehandlung des Betons“)

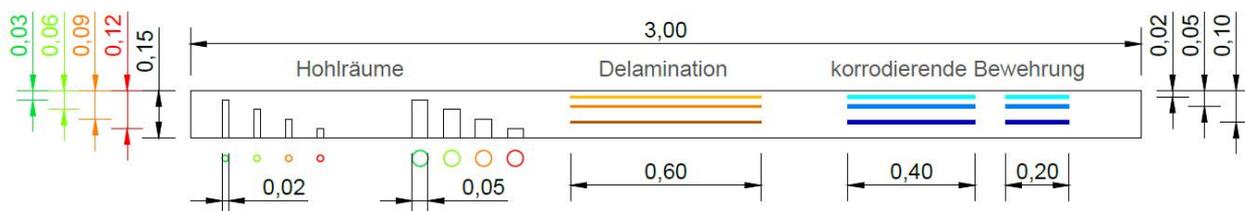


Abbildung 59: Querschnitt (alle Abmessungen in Meter) des Testkörpers mit den Schäden in unterschiedlichen Tiefenlagen samt Schadensart und Bezeichnung

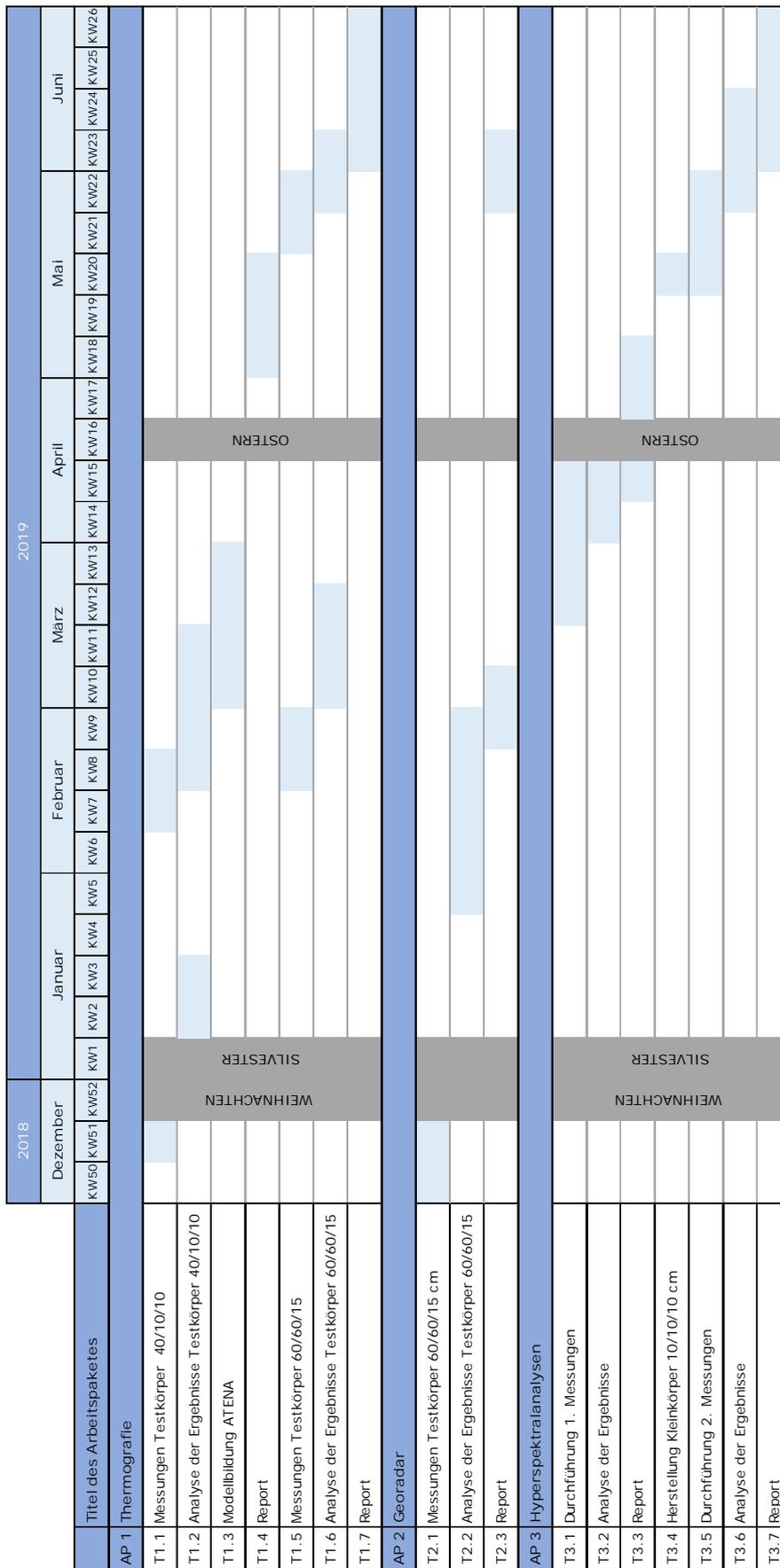


Abbildung 60: Sensoren, Arbeitsschritte und Zeitplan der Laborversuche (BOKU-IKI)

4.2 Sensorbeschreibung

4.2.1 Sensorübersicht und Vorauswahl

Für die Laborversuche wurden auf Basis der Literaturrecherchen Sensoren ausgewählt (siehe Tabelle 42), die eine zerstörungsfreie Feststellung von Schäden in Betonbauteilen erlauben. Ein weiteres wesentliches Kriterium für die Auswahl der getesteten Sensoren war die Eignung für einen mobilen Einsatz auf UAV (Unmanned Aerial Vehicles). Neben der grundsätzlichen Eignung für die Schadenserkennung ergeben sich aus diesem Kriterium zusätzliche Anforderungen hinsichtlich des maximalen Gewichts (Kleinst-UAV max. 1-2 kg, leistungsfähigere UAV rund 4-8 kg) und der Energieversorgung. Da die Zustandserfassung von Bauwerken mittels UAV zur Vermeidung von Kollisionen je nach den Witterungsverhältnissen und erforderlichen Auflösung typischerweise aus einem gewissen Abstand (ca. 3-10 m) erfolgt, muss eine kontaktlose Erfassung aus diesen Abständen möglich sein (Kap. 2.3).

Entsprechen die verfügbaren Sensoren nicht diesen Anforderungen, sind sie aber dennoch für eine effiziente Schadenserkennung geeignet, so kann ein mobiler Einsatz auf geeigneten Geräteträgern (Brückenprüfgerät) sinnvoll oder eine entsprechende Weiterentwicklung angezeigt sein. Ausgehend von der einschlägigen Literatur zeigt Tabelle 42 eine Übersicht nichtdestruktiver Erfassungsmethoden und verwendete Sensoren mit den erfassten Schadensmerkmalen sowie einer Einschätzung ihrer Eignung für den mobilen Einsatz. Die auf dieser Basis für die Laborversuche ausgewählten Aufnahmegeräte und Sensoren (Infrarotkameras, Hyperspektralkameras, Georadar, Multigasanalyse etc.) samt Messprinzip werden in der Folge näher beschrieben. Für weitere Informationen zur zerstörungsfreien Zustandserfassung wird auf die angeführte Literatur verwiesen.³²

Tabelle 42: Übersicht nichtdestruktiver Erfassungsmethoden und Sensoren

Sensor/Verfahren	Messprinzip	Schadensmerkmale	Eignung*
Infrarot-Thermografie (elektromagnetisch) 	Die Thermographie ist ein bildgebendes Verfahren, das eine Analyse von Struktur-schäden auf Basis von Temperaturunterschieden im Bauwerk erlaubt (z.B. Hohlräume behindern die Wärmeausbreitung). Dabei wird die für das menschliche Auge unsichtbare Wärmestrahlung (Infrarotlicht) eines Objektes sichtbar gemacht.	<ul style="list-style-type: none"> • Feuchtstellen • Hohlräume, Abplatzungen (Ausmaß und nur ungefähre Tiefe) • Korrosion • Materialänderungen • Überprüfung des Verbunds zwischen Fahrbelag und Bauteil 	Gut bis Sehr gut
Ultraschallecho (akustisch) 	Die Methode basiert auf der Tatsache, dass Ultraschallwellen in einem ansonsten homogenen Werkstoff an der Grenzfläche von Inhomogenitäten reflektiert werden. Dabei werden Ultraschallimpulse über einen Sendeprüfkopf in das Bauteil geschickt und von einem Empfangsprüfkopf auf derselben Oberfläche aufgenommen.	<ul style="list-style-type: none"> • Betongüte • Fehlstellen, Bauteilgeometrie • Hohlräume • Verpressfehler in Hüllrohren • Ortung von Spanngliedern • Risstiefenmessung 	Gering
Impact-Echo Technik (akustisch) 	Auf der Bauteiloberseite werden durch einen kurzen mechanischen Schlag (Stahlkugel) akustische Wellen generiert und deren Vielfachreflexionen im Bauteil mit Hilfe eines Sensors über die Zeit aufgezeichnet. Die Daten werden über eine Fast Fourier Transformation in den Frequenzbereich umgewandelt und analysiert.	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlstellen, Bauteilgeometrie • Hohlräume • Pfahlintegrität • Beurteilung der Bettung von Flachgründungen • Überprüfung des Verbunds zwischen Fahrbelag und Bauteil 	Gering

³² vgl. MALHOTRA, V. M. et al. (2004); BUNGEY, J. H. et al. (2006); ACI (2013) u.a.

Radiographie Gamma (elektromagnetisch) 	<p>Das Verfahren basiert auf der Absorption von Gamma- oder Röntgenstrahlung durch Material-, Dichte- und Dickenunterschiede in Bauteilen. Die Prüfungsanordnung besteht aus einer Strahlquelle auf der einen Seite des Bauteils und ein Bildaufnahmesystem auf der gegenüberliegenden Seite (radiografische Filme oder digital).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlstellen, Bauteilgeometrie • Materialänderungen • Hohlräume • Verdichtungsmängel • Interne Risse • Zustand von Spanngliedern • Korrosion (Stahldurchmesser) 	<p>Gering</p>
Potenzialfeldmessung (elektrochemisch) 	<p>Das Verfahren basiert auf der Bestimmung der Potentialdifferenz zwischen einer über die Betonoberfläche entlanggeführte Bezugselektrode und der Bewehrung. An der Oberfläche ankommende Potentiale werden mit einem Voltmeter gemessen, das mit einem Bewehrungsstahl und der Bezugselektrode verbunden ist.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Korrosion 	<p>Gering</p>
Georadar (elektromagnetisch) 	<p>Das Verfahren beruht auf der Aussendung elektromagnetischer Wellen in das zu untersuchende Bauteil. Die Wellen werden an Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften reflektiert. Die Reflexionen werden durch eine Empfangsantenne aufgenommen und als Funktion der Zeit digital aufgezeichnet.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bewehrungslage • Betondeckung • Hohlräume, Risse • Betondichte, Porosität • Ortung von Spanngliedern • Feuchtstellen • Ortung von Ankern in Betonfahrbahnen 	<p>Mittel</p>
Elektrischer Betonwiderstand (4 Elektroden) 	<p>Der elektrische Betonwiderstand wird mit der Wenner Vierpunktmessung ermittelt. Dabei werden vier Elektroden in einer Reihe auf die Betonoberfläche gebracht. Zur Stromspeisung werden die äußeren Elektroden benutzt und der im Feld entstehende Spannungsabfall wird über die inneren Elektroden abgegriffen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Korrosionsrisiko • Feuchtigkeitsgehalt im Beton • Chlorideindringwiderstand von Beton 	<p>Gering</p>
Streufeldprüfung (magnetisch) 	<p>Das zu prüfende Bauteil wird mit Elektromagneten oder Zylinderspulen magnetisiert. Die durch die Magnetisierung entstehenden Feldlinien verlaufen parallel zur Oberfläche. Defekte in ferromagnetischen Materialien wie Stahl erzeugen örtlich erhöhte Streufelder, die durch Magnetfeldsensoren detektiert werden können.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Korrosion • Spanngliedbrüche • Überprüfung der Kabel von Hängebrücken und Schrägseilbrücken 	<p>Gering</p>
Galvanostatische Puls-messung 	<p>Der Bewehrung wird über einen auf der Betonoberfläche aufgesetzten Messkopf mit Bezugs- und Gegenelektrode kurzzeitig ein geringer, konstanter Strom aufgeprägt. Aus der Extrapolation des Verlaufs des resultierenden Potentials wird der Polarisationswiderstand als Messgröße der Korrosionsgeschwindigkeit ermittelt.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Korrosionsgeschwindigkeit 	<p>Gering</p>
Hyperspektralkamera (elektromagnetisch) 	<p>Wenn die elektromagnetische Strahlung ein Objekt trifft, wird diese in Abhängigkeit der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Objektes entweder reflektiert, absorbiert oder transmittiert. Dadurch erlaubt die Hyperspektralkamera, detaillierte Informationen über die aufgenommene Oberfläche zu erhalten.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammensetzung des Betons • Härte der Betonoberfläche • Betonfestigkeit • Karbonatisierung und Chlorideindringung 	<p>Gut bis Sehr gut</p>

Legende: Die Eignung wird hinsichtlich der Bedeutung und Zuverlässigkeit in der Erkennung von typischen Schäden an Betonbauwerken, der Verfügbarkeit entsprechender Sensoren sowie einem möglichen mobilen Einsatz (UAV) beurteilt

4.2.2 Infrarotkamera

Infrarotkameras sind Geräte zur Bildgebung im Spektralbereich von 0,78 μm bis 1 mm. Zwischen der elektromagnetischen Strahlung und der Temperatur besteht ein Zusammenhang, das Verfahren erlaubt die Wärmestrahlung eines Körpers sichtbar zu machen. Aufgrund von Temperaturunterschieden im Bauwerk ist es mittels Infrarotkamera möglich auf Schäden in der Struktur zu schließen. Dadurch können feuchte Stellen sowie Delamination erkannt werden. Delamination bei Stahlbeton werden z.B. durch korrodierenden Bewehrungsstahl verursacht. Die Oberfläche einer geschädigten Struktur kann sich erwärmen. Die Schädigung (Delamination) unter der Oberfläche wirkt als Luftzwischenraum der isoliert und den Wärmefluss reduziert. Die Delamination verursacht bei Steigung der Umgebungstemperatur im Bereich des Schadens eine raschere Erhöhung der Oberflächentemperatur im Vergleich zu dem Bereich ohne Schaden. Da der Wärmefluss in die Struktur durch den Schaden vermindert wird. Umgekehrt verliert die Oberfläche des geschädigten Bereichs bei Abkühlung der Umgebungstemperatur rascher an Temperatur als intakte Bereiche.³³

In Abbildung 61 ist der Temperaturverlauf der Umgebungstemperatur für den geschädigten und intakten Bereich einer Betonstruktur über den Tagesverlauf dargestellt. Es wird der Wärmefluss in der Struktur für zwei verschiedene Perioden (Erwärmung und Abkühlung der Struktur) gezeigt. Die Delamination ist nach Sonnenuntergang am deutlichsten zu messen, da in diesem Zeitraum die Luft einen entsprechenden Temperaturabfall erfährt und der Temperaturunterschied zwischen intaktem und geschädigtem Bereich ausreichend groß für die Detektion mittels Infrarotkameras ist. Bei den durchgeführten Messungen lagen die typischen Temperaturunterschiede im Zeitraum dieser Abkühlung bei 0,2°C (18:30 – 21:00 Uhr) und 0,1°C (21:00 – 23:00).

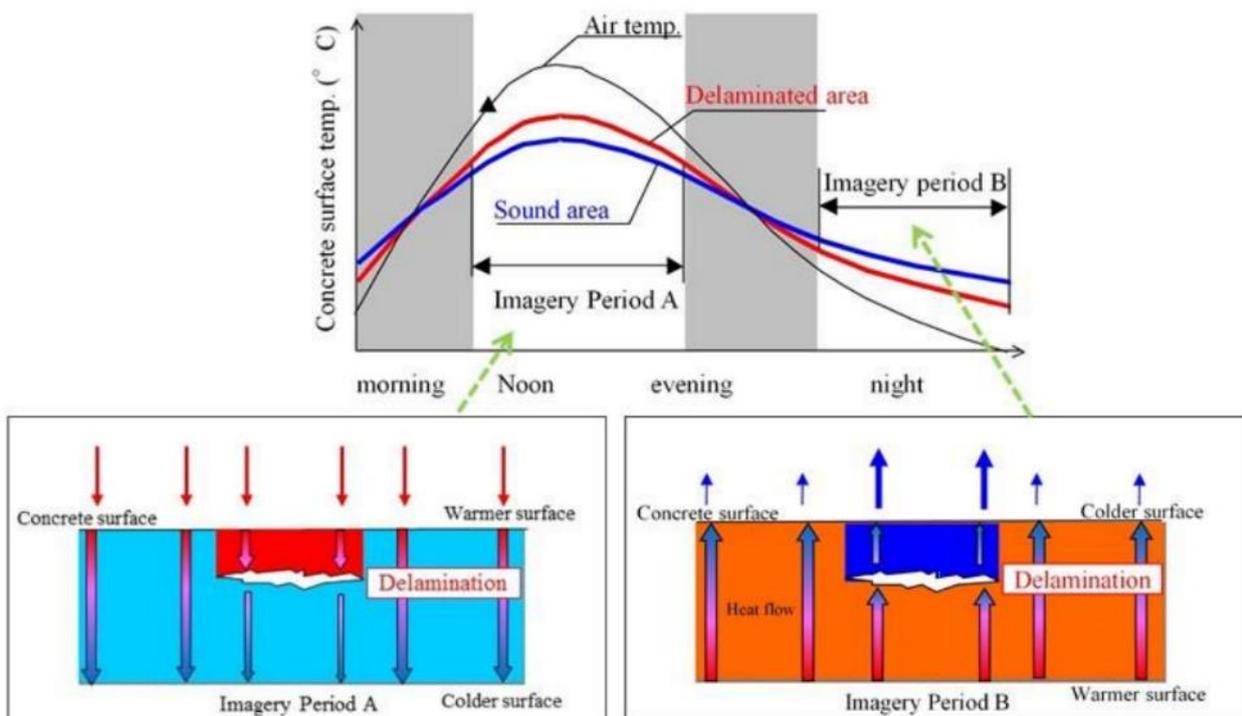


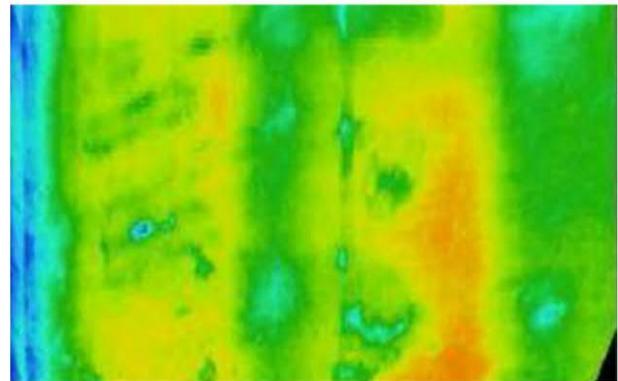
Abbildung 61: Prinzip für die Detektion von Delamination (aus NEXCO-West 2014a)

³³ vgl. NEXCO-West (2014a,b); HIASA, S. (2016); JANKŮ, M. et al. (2017);

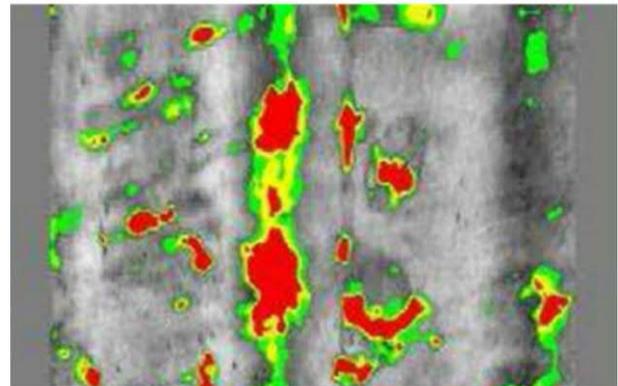
Ziel der Untersuchungen in RISKMON war es u.a. die Temperaturunterschiede zwischen Umgebungstemperatur, intaktem Bereich und delaminiertem Bereich eines Testobjektes aus Beton über einen Zeitraum ab dem Zeitpunkt des Sonnenuntergangs bis über mehrere Stunden zu analysieren. Auf Basis der Ergebnisse aus Laborversuchen konnte eine Klassifizierung der detektierten Unterschiede erfolgen. Wie in Abbildung 62 zu sehen, kann Delamination mit einer geeigneten Software automatisch erkannt und klassifiziert werden. Der Schaden kann in drei Kategorien mit Delamination in einer Tiefe von größer als 4 cm (Schaden im Anfangsstadium) bis hin zur Delamination an der Oberfläche (mit Instandsetzungsbedarf) klassifiziert werden. Dies ist für eine Einschätzung der Schadensschwere ausreichend. Das Schadensausmaß kann dagegen direkt über die kategorisierte Schadensfläche bestimmt werden, was in der Folge die Maßnahmenwahl erleichtert. Bei den Laborversuchen wurden in den Testkörpern Hohlräume und Delamination unter verschiedenen Bedingungen detektiert. Die Testkörper wurden Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit und Temperaturänderungen ausgesetzt, um die optimalen Bedingungen zur Erhebung dieser Schäden festzustellen. Die Hohlräume wurden im trockenen und befeuchteten Zustand analysiert, als auch bei unterschiedlichen Temperaturen des Testkörpers. Für die Erkennung der Delamination wurde bei den Versuchen mit Temperaturunterschieden unter typischen Verhältnissen gearbeitet.

Bei der Erfassung der Schäden war die Berücksichtigung der Verschmutzung der Oberfläche des Betonkörpers von großer Wichtigkeit. Verschmutzungen, Feuchtigkeit und Ölflecken auf der Oberfläche können die Resultate der thermalen Bildaufnahme beeinflussen. In solchen Fällen ist es nötig, die Betonoberfläche zusätzlich mit Fotos aufzunehmen, um diese Bereiche von Bereichen mit Delamination zu unterscheiden. Bei den Versuchen wurde daher das Ziel definiert, zu erfassen, inwieweit die Verschmutzungen Einfluss auf die Messergebnisse haben. Windverhältnisse können ebenfalls einen Einfluss auf die thermographischen Aufnahmen haben. In den Laborversuchen war es daher das Ziel neben einer Validierung des Messprinzips die Festlegung der erforderlichen Bedingungen für eine möglichst zuverlässige Erfassung der Schadensmerkmale in den Feldversuchen an den Bauwerken zu treffen.³⁴

Thermografische Aufnahme (unbearbeitet)



Prozessierte Aufnahme (z.B. IrBAS Software)



Schadensklassifizierung (z. B. IrBAS Software)

Damage Rating		Temp. Distribution
Crack Location	Rating	
	Indication 	
	Caution 	
	Critical Emergent Action Required 	

Abbildung 62: Thermografische Aufnahmen einer Brückenfläche mit Schadensdetektion und Schadensklassifizierung (aus NEXCO-West 2014a,b

³⁴ vgl. VAGHEFI, K. et al. (2011)

4.2.3 Hyperspektralkamera

Mit Hyperspektralkameras lassen sich das reflektierte Licht (Spektrum) eines Materials erfassen. Dieses reflektierte Licht kann genutzt werden um Merkmale (Schäden, chemische Bestandteile) an der Oberfläche zu detektieren. Aus dem elektromagnetischen Spektrum kann das Auge nur einen geringen Teil wahrnehmen, nämlich die Farben des sichtbaren Lichtes in der Nähe des Zentrums des Spektrums. Hyperspektralkameras ermöglichen es Informationen aus einer großen Bandbreite des elektromagnetischen Spektrums aufzunehmen und zu verarbeiten. Dabei wird anhand einer Reihe von engen, nahezu zusammenhängenden Wellenlängenbändern die Reflexion der elektromagnetischen Strahlung gemessen. Dabei wird die elektromagnetische Strahlung auf die Oberfläche entweder reflektiert, absorbiert oder transmittiert. Dadurch ist es möglich, detaillierte Informationen über die aufgenommene Oberfläche zu erhalten. Wenn die elektromagnetische Strahlung ein Objekt trifft, wird diese in Abhängigkeit der physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Objektes entweder reflektiert, absorbiert oder transmittiert. Die Aufzeichnung der Reflexion der elektromagnetischen Strahlung über einen bestimmten Wellenlängenbereich, erlaubt die Erzeugung sogenannter spektraler Signaturen. Diese ermöglichen es unterschiedliche Materialtypen und ihre Eigenschaften zu detektieren. Abbildung 63 zeigt die spektrale Signatur verschiedener Oberflächen aus einem Anwendungsfall.³⁵

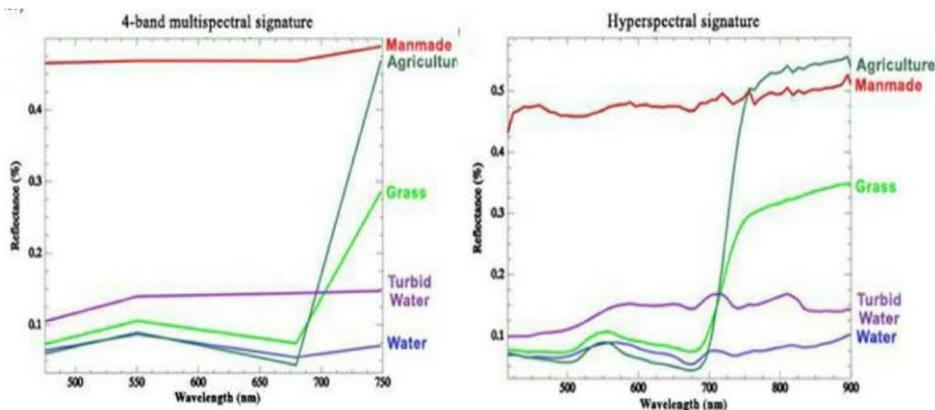


Abbildung 63: Materialbestimmung mittels spektraler Signatur (aus SHABAN 2013)

Die Analyse der aufgenommenen Hyperspektraldaten erfolgt über sogenannte Spektralbibliotheken. In diesen sind eine große Bandbreite an hyperspektralen Signaturen für unterschiedlichste Materialien vorhanden. Die hyperspektrale Analyse liefert wertvolle Informationen über Materialeigenschaften von Oberflächen. Es ist möglich auch Eigenschaften von Beton, wie die Zusammensetzung des Betons zu erheben, da z.B. Zement mehr Einfluss auf die Reflexion der elektromagnetischen Strahlung hat als die übrigen Komponenten. Es kann gezeigt werden, dass die Reflexion mit fortschreitender Hydratation steigt und ab sechs Wochen stabil bleibt. Die Reflexion erlaubt Aussagen über die Härte der Betonoberfläche. Auswertungen zeigen zudem Unterschiede zwischen den spektralen Signaturen von neuen und älteren Betonkörpern. Es konnte auch gezeigt werden, dass hyperspektrale Messungen Aussagen über die Betonfestigkeit erlauben. Hyperspektralanalysen wurden auch bereits angewandt, um Karbonatisierung und Chlorideinwirkung im Beton zu charakterisieren.³⁶ In den Laborversuchen wurden die Detektionsmöglichkeiten und Grenzen für die Erfassung von Hohlräumen, Delamination und korrodierender Bewehrung mittels Hyperspektralanalysen erhoben. Die Ergebnisse dieser spektralen Analysen von intakten und geschädigten Bereichen finden sich in Kapitel 4.3.6.

³⁵ vgl. SHABAN, K. (2013)

³⁶ vgl. MARCEAU, N. L. et al. (2008); BROOK et al. (2018); EZATY M. N. et al. (2011); ARITA, J. (2001)

4.2.4 Georadar

Georadar wird zur zerstörungsfreien Prüfung von Beton angewandt, um die Lage der Bewehrung bzw. die Betondeckung zu messen. Georadar ist ein zerstörungsfreies Messverfahren, das zur Untersuchung des Untergrundes mittels Aussendung von elektromagnetischen Strahlen dient. Dazu werden anhand von Antennen Signale in die zu untersuchende Struktur gesendet. Das reflektierte Signal ist von der Materialbeschaffenheit abhängig und wird von der Empfangsantenne aufgenommen. Anhand entsprechender Spezialsoftware können die Daten ausgewertet und analysiert werden. Somit können beispielsweise unter bestimmten Voraussetzungen die Tiefen von unterschiedlichen Schichten im Untergrund bestimmt werden. Im Bereich der Verkehrsinfrastruktur wird Georadar vor allem für die Untersuchung von Fahrbahnen, Brücken- und Tunnelbauwerken eingesetzt. Im Zuge der Straßenerhaltung wird Georadar vor allem für die Messung der Dicke der einzelnen Schichten des Straßenaufbaus (gebundene und ungebundene Tragschichten), der Ablösung und Delamination der Schichten und der Heterogenität des Straßenaufbaus, wie die Identifizierung von Hohlräumen oder Frosthebung verwendet.³⁷

In Untersuchungen wurde bewiesen, dass die Erhebung von Eigenschaften der Fahrbahn wie der Feuchtegehalt, der Porenanteil, oder die Tiefe von Oberflächenrissen mittels Georadars möglich ist. Die Diagnose von Brücken mit Georadar wird üblicherweise an Beton- und Steinbrücken angewandt. Es wird in der Regel der Zustand der Brückenfahrbahn (Risse, Hohlräume) erfasst. Es lässt sich auch die Lage der Bewehrung oder Spannglieder im Tragwerk erfassen. Der Chlorid- und Wassergehalt im Beton hat ebenfalls einen messbaren Einfluss auf die Signalamplituden und ist mittels Georadars bestimmbar. Außerdem kann auf die Lage und den Zustand der Bewehrung (z.B. Korrosion) geschlossen werden (Abbildung 64). Im Zuge der Laborversuche wurde das Georadar auf einige seiner vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten getestet, insbesondere die Detektion von Schäden im Beton. An Betonkörpern wurden die Hohlräume (trocken und befeuchtet), Delamination und korrodierende Bewehrung. Es konnte der Umfang und die Grenzen zur Erfassung von Betonschäden mittels Georadars festgestellt werden.³⁸

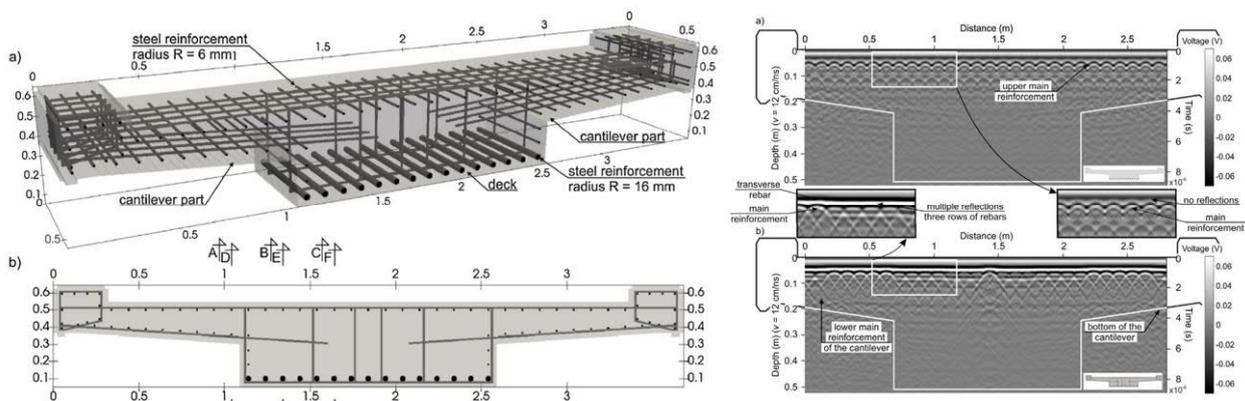


Abbildung 64: Bestimmung der Bewehrungslage mittels 3D – finite Zeitdifferenzmodellierung des Georadars (aus LACHOWICZ, J. et al. 2018)

³⁷ vgl. HUGENSCHMIDT, J. et al. (2006); BENEDETTO, A. et al. (2015)

³⁸ vgl. BENEDETTO, A. et al. (2015); KRYSIŃSKI, L. et al. (2013); FITHRY-SENIN, S. et al. (2015); HUBBARD, S. et al. (2003); LACHOWICZ, J. et al. (2018)

4.3 Versuchsdurchführung

4.3.1 Übersicht Versuchsprogramme

Die durchgeführten Laborversuche setzen sich aus einer Reihe von Versuchsprogrammen zusammen, im Zuge derer die ausgewählten Sensoren unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen eingesetzt worden sind. In diesem Kapitel werden die einzelnen Versuchsprogramme vorgestellt. Eine Übersicht der durchgeführten Versuche ist in Tabelle 43 dargestellt. Der Fokus liegt auf der Thermografie, dem Georadar und den Hyperspektralanalysen. Diese Sensoren erweisen sich für die Detektion von Betonschadensmerkmalen als geeignet. Die Ergebnisse und Empfehlungen aus den Versuchen werden im Kapitel 4.5 behandelt.

Tabelle 43: Übersicht der Laborversuche

<p>Thermografie:</p> <p><i>Versuchsprogramm I</i> - Kleinkörperversuche mit Betonkörpern 40x10x10cm</p> <ul style="list-style-type: none"> I. Aufnahmen II. Modellierung (siehe Kapitel 4.4) III. Ermittlung der Detektionswahrscheinlichkeit (siehe Kapitel 4.4) <p><i>Versuchsprogramm II</i> - Plattenversuche mit Betonkörpern 60x60x15cm</p> <ul style="list-style-type: none"> I. Künstliche Erwärmung II. Natürliche Erwärmung durch Sonneneinstrahlung <p><i>Versuchsprogramm III</i> – Italienschleife</p>
<p>Georadar:</p> <ul style="list-style-type: none"> I. Plattenversuche mit Betonkörpern 60x60x15 cm II. Expertenerhebung
<p>Hyperspektralanalysen:</p> <ul style="list-style-type: none"> I. Untersuchung von Betonprobewürfeln 10x10x10cm mit Chlorid auf der Oberfläche II. Untersuchung von karbonatisierten Betonproben

4.3.2 Thermografie Versuchsprogramm I

Es ist möglich (siehe Kapitel 4.2.2) während der Erwärmung bzw. der Abkühlung von Betonbauwerken Schadenstellen wie Delamination bzw. Hohlräume mittels Thermografieaufnahmen zu erkennen. Diese Stellen sind bei ausreichender Größe und Nähe zur Oberfläche gut detektierbar. In den Laborversuchen sollte die Frage beantwortet werden, bis zu welcher Tiefe und welcher Größe Schadstellen wie Hohlräume und Delamination erkennbar sind.

Im Versuchsprogramm I war es das Ziel die Eignung von Thermografie zur Zustandsbewertung von Betonstrukturen hinsichtlich der Auffindung und Auswertung von Hohlstellen bzw. Feuchtstellen in Betonprobekörpern zu bewerten. Es wurden Probekörper mit nachfolgenden Eigenschaften hergestellt und mit einer Thermalkamera aus verschiedenen Abständen thermografiert. Die Betonprobekörper wurden mit Hohlräumen (Bohrungen) in verschiedenen Tiefenlagen hergestellt. Für die Bohrungen wurden Durchmesser von 1,3 bzw. 2,5 cm gewählt. Die Versuche dienten neben der Einschätzung der Detektierbarkeit von Hohlstellen zur Kalibrierung von Finite Elemente Modellen für thermische Analysen. Diese Finite Element Modelle erlaubten die Detektionswahrscheinlichkeit der Hohlstellen mittels Thermografie zu charakterisieren.

Für die Kalibrierung der Finite Elemente Modelle dienten in den Betonkörpern eingebrachte Temperatursensoren welche in regelmäßigen Abständen eingebaut wurden. Die eingebauten Temperatursensoren erlaubten es den Wärmefluss im Beton und den Temperaturverlauf über die Zeit während der Aufwärm- und Abkühlphase zu bestimmen. Abbildung 65 und Abbildung 66 zeigen den Grundriss und die Ansicht der Probekörper mit den Temperatursensoren (rot) und den vertikal orientierten (links) bzw. horizontal orientierten Hohlräumen (rechts).

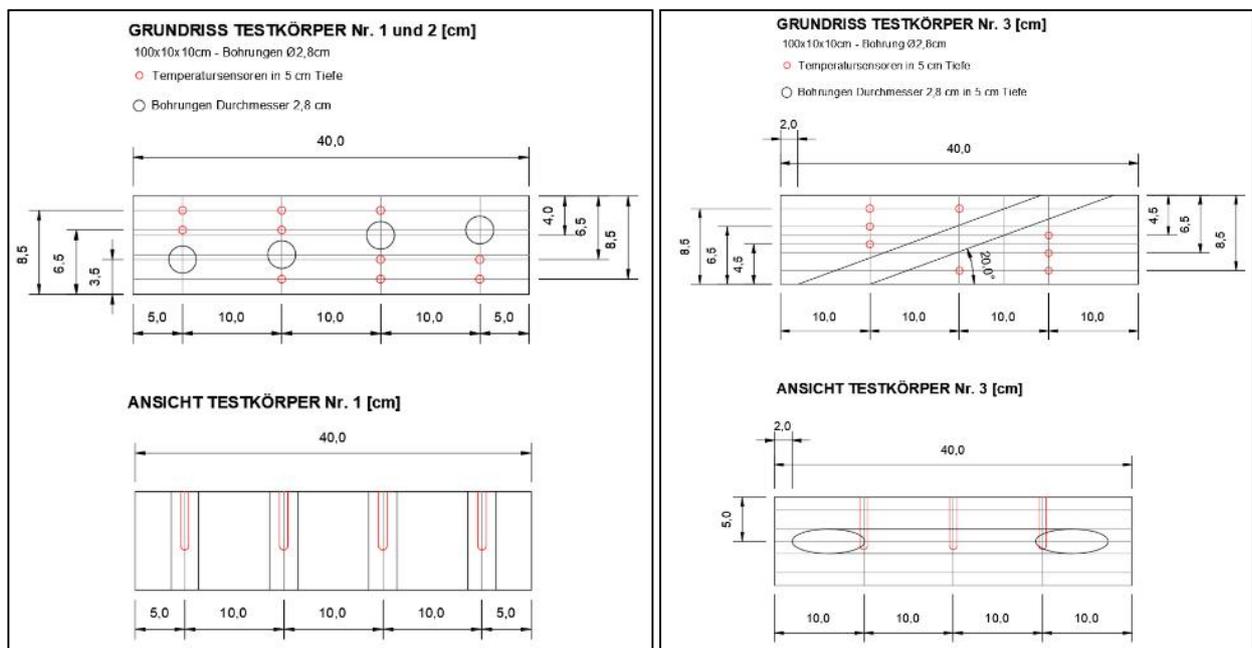


Abbildung 65: Grundriss und Ansicht der hergestellten Testkörper Nr. 1, 2 und 3 mit der Lage der Bohrungen und Temperatursensoren

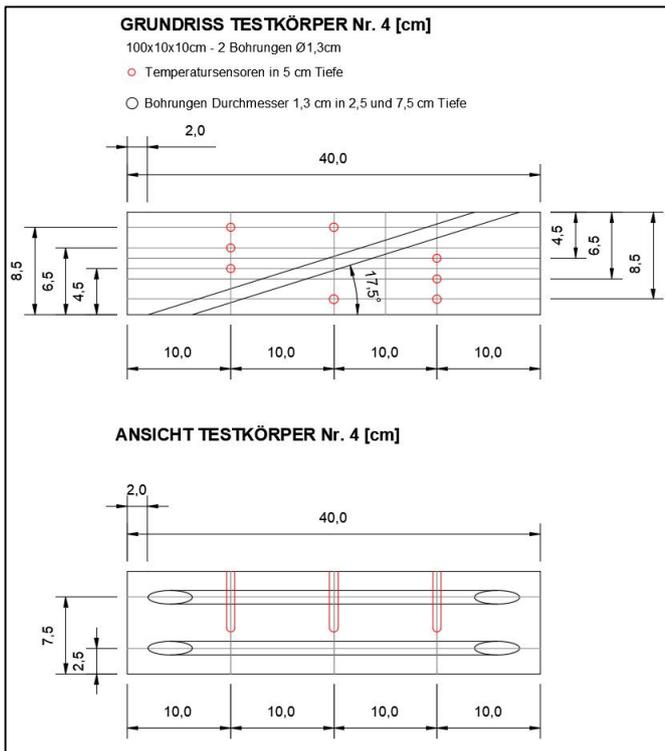


Abbildung 66: Grundriss und Ansicht des hergestellten Testkörpers Nr. 4 mit der Lage der Bohrungen und Temperatursensoren und Messaufbau (rechts unten)

Die Thermografieaufnahmen erfolgten mit einer FLIR E60bx und einer FLIR Vue Pro 640 R. Die FLIR E60bx wird hauptsächlich für manuelle Aufnahmen verwendet. Die FLIR Vue Pro ist speziell für den Einsatz auf UAS entwickelt und aufgrund Ihrer Abmessungen und des Gewichtes auch besonders dafür geeignet. Abbildung 67 zeigt die technischen Daten der FLIR E60bx und Abbildung 68 zeigt die technischen Daten der FLIR Vue Pro 640 r.

FLIR E60bx	
Spektralbereich:	7,5-13,0 µm
Sensorauflösung:	320x240 Pixel
Sichtfeld:	25*19°
Mindestabstand:	0,4 m
Thermische Empfindlichkeit:	<0,045°C
Abmessungen:	246 × 97 × 184 mm
Gewicht:	825 g
Anwendung:	Handheld



Abbildung 67: Geräteeigenschaften FLIR E60bx

FLIR Vue Pro 640 R	
Spektralbereich:	7,5-13,5 µm
Sensorauflösung:	640x512 Pixel
Sichtfeld:	32*26°
Mindestabstand:	1,0 m
Thermische Empfindlichkeit:	<0,05°C
Abmessungen:	57 × 45 × 45 mm
Gewicht:	115 g
Anwendung:	Drohnen



Abbildung 68: Geräteeigenschaften FLIR Vue Pro 640 R

Die Erwärmung der Testkörper erfolgte einerseits von vorne und von hinten jeweils über einen Zeitraum von 2 h. Anschließend wurden untermittelbar nach Abschalten der Strahlungsquelle Aufnahmen von der Vorderseite der Versuchskörper über einen Zeitraum von zwei Stunden im 10 min Takt während der Abkühlphase getätigt. Die Messungen erfolgten jeweils an der Vorderseite (einmal der Strahlungsquelle abgewandt und einmal auf der Strahlungsquelle zugewandten Oberfläche). Wie in Abbildung 69 zu sehen, wurden die Aufnahmen in mehreren Durchgängen in unterschiedlichen Abständen (1, 2 ,3 und 5 m) von den Testobjekten durchgeführt. In weiteren Durchgängen wurden die Bohrlöcher mit 12°C kalten Wasser gefüllt bzw. durchströmt und die Testkörper nach Bestrahlung von vorne bzw. von hinten mit der gleichen Vorgehensweise wie oben aufgenommen.

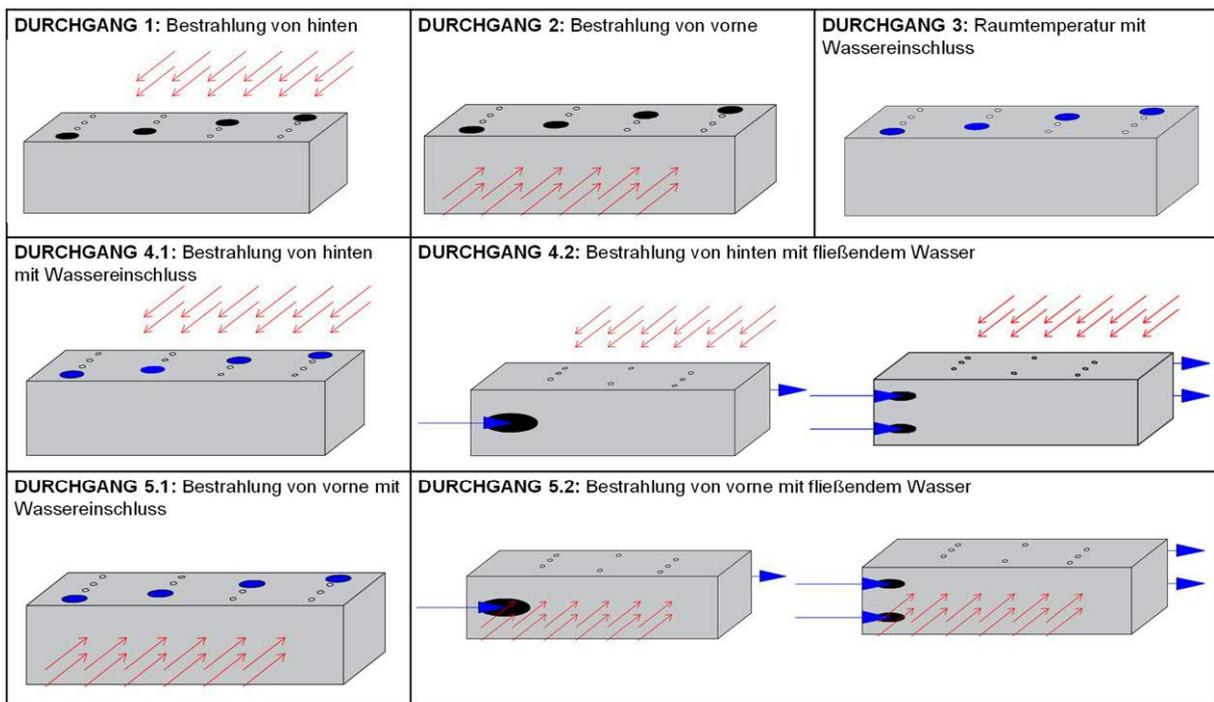


Abbildung 69: Darstellung der verschiedenen Messdurchgänge mit Erwärmung der Testkörper von vorne, von hinten, mit und ohne Wasser durchströmten Löchern

Die Messdaten und gemessenen Temperaturverläufe der Versuche sind im Anhang 10.5.1 detailliert dargestellt und ausgewertet.

4.3.3 Thermografie Versuchsprogramm II

Ziel des zweiten Versuchsprogrammes war es, die in Kapitel 4.1 beschriebenen Betonplatten unter Laborbedingungen und natürlicher Sonneneinstrahlung im Außenbereich für verschiedene Wärmeflussphasen zu analysieren. In die untersuchten Betonplatten mit den Abmessungen 600/600/150 mm wurden Hohlstellen, Delamination und Bewehrungsseisen in unterschiedlichen Tiefenlagen bei der Produktion eingebaut (teilweise in der Lage bekannt, teilweise unbekannt).

Die Messungen erfolgten an den schräg positionierten Platten, siehe Abbildung 70, wobei die Strahlungsquelle von den Platten für eine Dauer von 2 h angeordnet war. Anschließend wurden die Platten während der Abkühlphase aus den Entfernungen 1, 2, 3, und 5 m mit den Kameras FLIR E60bx und FLIR Vue Pro 640 R aufgenommen.



Abbildung 70: Messaufbau im Labor

Die Aufnahmen erfolgten im 10 Minuten Takt über insgesamt zwei Stunden bei einer Raumtemperatur von 24°C. Die Betonplatten wurden vorne auf über 70 °C aufgeheizt. Am Ende der Aufnahmen waren die Platten bereits auf 35 °C auf der Oberfläche abgekühlt. Durch die ungleichmäßige Erwärmung der Oberfläche (zum Rand hin kühler werdend) aufgrund der Begrenzungen der Strahlungsquelle waren nur Teile der Delaminationsschichten eindeutig erkennbar. Die Abbildung 71 verdeutlicht die Ausprägung der Temperaturdifferenz zwischen intakten und geschädigten Bereichen über die gesamte Aufnahmezeit.

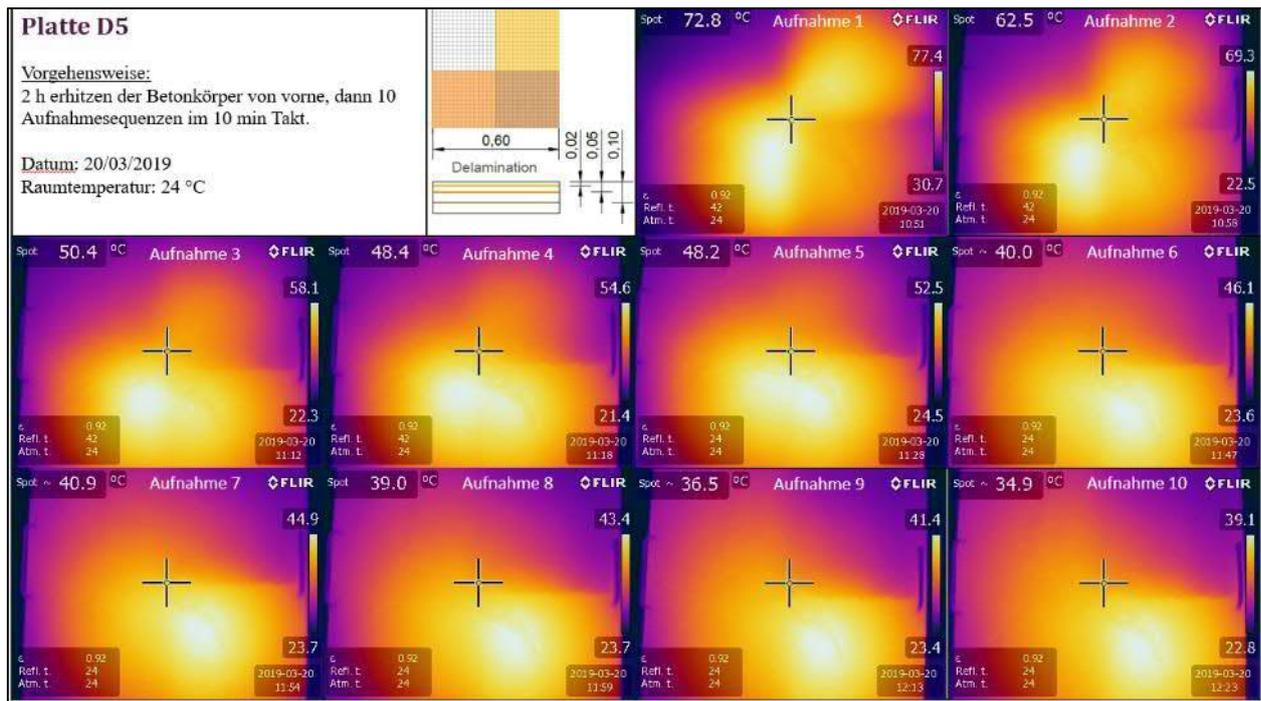


Abbildung 71: Aufnahmen der Platte D5 nach Erhitzen im 10 min Takt

Für die Charakterisierung der Effekte der natürlichen Umwelteinflüsse, also Erwärmung durch Sonneneinstrahlung, wurden die Platten in einem weiteren Versuch im Außenbereich in horizontaler Lage angeordnet. Es wurde der Temperaturverlauf der Oberfläche der Platten über einen gesamten Tag aufgezeichnet, um festzustellen zu welcher Tageszeit die Schäden am besten erkannt werden können. Mittels der natürlichen Sonneneinstrahlung wurden die Platten über einen ganzen Tag gleichmäßig bestrahlt und erwärmt. Am späteren Nachmittag erfolgte die zu erwartende Abkühlung.

Abbildung 72 stellt eine Platte mit Delamination in unterschiedlichen Tiefen dar, die während des Versuches während des gesamten Tages im Stundentakt aufgenommen wurde. Es lässt sich feststellen, dass durch die gleichmäßige Erwärmung über die gesamte Platte, die geschädigten Stellen besser erkennbar sind als bei den Versuchen im Labor, bei denen die Erwärmung über eine konzentrierte Strahlungsquelle erfolgte. Die Delaminationsschichten, die näher der Oberfläche lokalisiert sind, können bereits nach kurzer Aufwärmphase erkannt werden, da in diesem Bereich die Temperatur am schnellsten steigt. Aber auch die tiefer liegenden Schadstellen lassen sich sowohl in der Erwärmungsphase, als auch in der Abkühlphase vor allem zur Mittagzeit bzw. vor Mitternacht eindeutig erkennen. Während der Auskühlung der Platten am Abend kühlen sich die Bereiche mit Delamination schneller ab, weshalb diese auch dann sehr gut von den wärmeren intakten Bereichen unterschieden werden können.

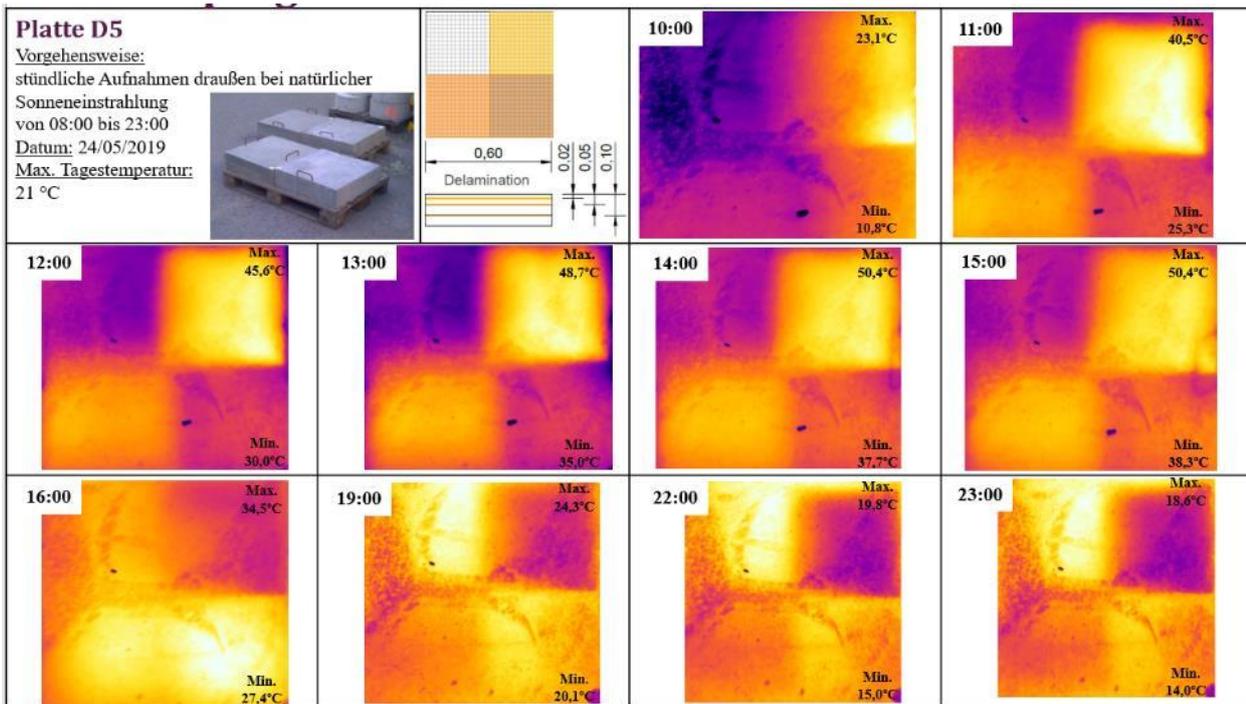


Abbildung 72: Temperaturfelder der Platte D5 im Tagesverlauf unter Sonneneinstrahlung

Im Zuge des Versuchsprogrammes II wurde der Fokus vor allem auf die Delamination gelegt und die notwendigen Bedingungen zur erfolgreichen Schadenserkennung ermittelt. In Folge der Sonneneinstrahlung auf die Betonkörper konnten Delaminationsschichten bis in eine Tiefe von 10 cm detektiert werden. Sämtliche Aufnahmen und Dokumentationen der Versuche sind Anhang 10.5.2 zu entnehmen.

4.3.4 Thermografie Versuchsprogramm III

Im dritten Versuchsprogramm wurde die Schadensdetektion mittels Thermokamera an realen Brückenbauwerken, der Italienschleife in Floridsdorf sowie den Bahnbögen der Viaduktgasse getestet. Aufgenommen wurden mehrere Details der Bauwerke an unterschiedlichen Tagen in zeitlichen Abständen von zwei bis vier Stunden. Es wurden regnerische und sonnige Phasen gewählt, um den Einfluss der Witterung auf die Schadensdetektion feststellen zu können.

Die Abbildung 73 mit einem Detail der Italienschleife zeigt zeitlich unterschiedliche Aufnahmen an einem regnerischen Tag. Die Temperatur im Tagesverlauf war nahezu konstant, wodurch keine Temperaturunterschiede zwischen schadhaften und intakten Stellen festgestellt werden konnten. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Aufnahmen unter den gegebenen Umweltbedingungen für Inspektionen kaum geeignet sind. Jedoch sind die Bauteilkanten durch die Auskühlung infolge eines leichten Windgangs auch bei Finsternis erkennbar.

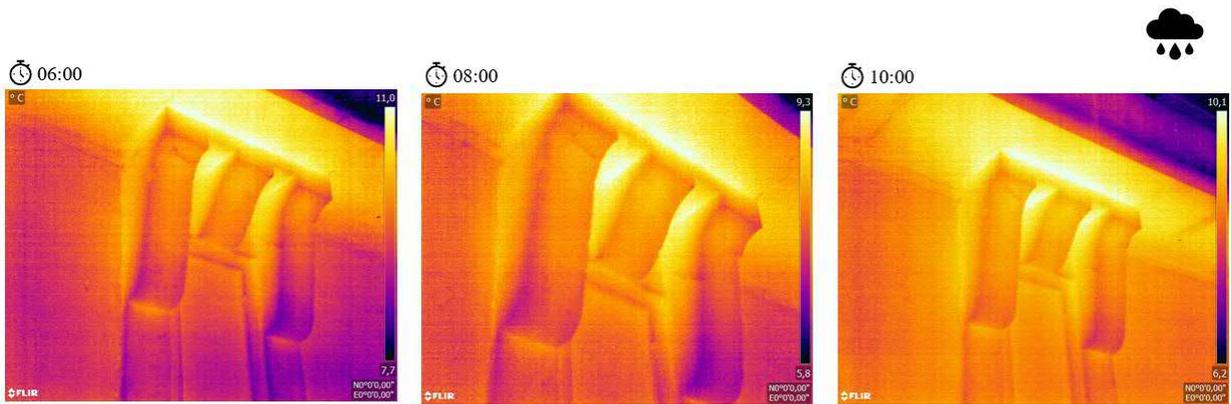


Abbildung 73: Detail 1 Italienschleife bei regnerischem Wetter zu verschiedenen Uhrzeiten

Die Detailaufnahme der Italienschleife in Abbildung 74 zeigt einer stärkere Temperaturamplitude im täglichen Verlauf (6°C). Veränderungen in der Betonstruktur und Auffälligkeiten unter der Oberfläche sind durch die günstigeren Wetterbedingungen erkennbar (Sonne nach Regen). Die Aufnahmen der Italienschleife weisen darauf hin, dass unter geeigneten Umweltbedingungen grundsätzlich bessere Aussagen zu Schäden und Auffälligkeiten am Bauwerk getroffen werden können.

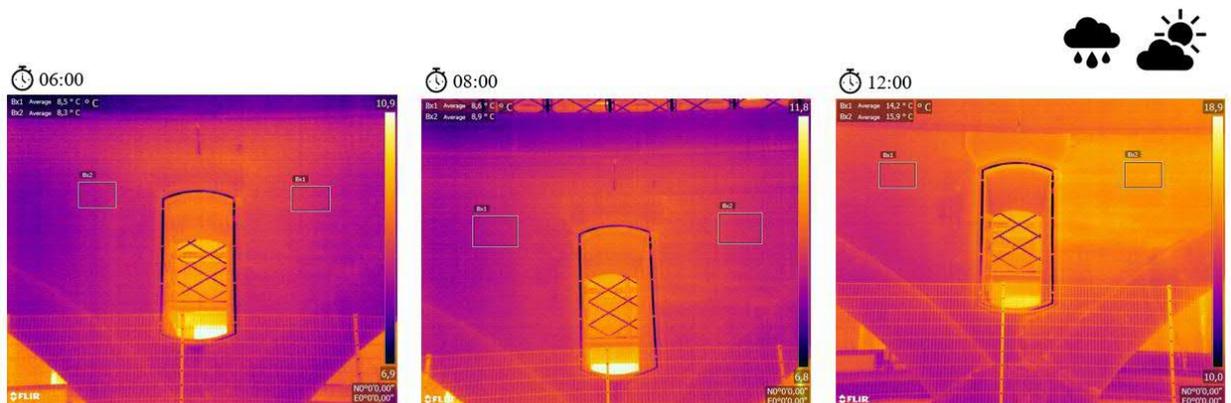


Abbildung 74: Detail 2 Italienschleife bei sonnigem Wetter nach Regen zu verschiedenen Uhrzeiten

Die Detailaufnahmen der Bahnbögen der Viaduktgasse wurden über den gesamten Tag (08:00 – 22:00) im zwei Stunden Takt aufgenommen. Je nach Zeitpunkt zeichnen sich unterschiedliche Schäden klar in den Aufnahmen ab. So können in Abbildung 75 um 10:00 Uhr Details wie unterschiedliche Materialeigenschaften, Materialgrenzen, Einbauteile und eventuell auch Bewuchs bzw. Verschmutzung erkannt werden. In der Aufnahme um 12:00 Uhr sind Komponenten Grenzen und Inhomogenitäten unter der Oberfläche ersichtlicher.

Die Aufnahmen der Viaduktgasse zeigen sehr gut, wie wichtig es ist, mehrere aufeinanderfolgende Aufnahmen während des Tagesverlaufes durchzuführen, um Veränderung der Temperaturen auf der Oberfläche infolge von Schäden besser feststellen zu können. Ideale Bedingungen zur Schadensdetektion herrschen zur Mittagszeit während sich die Bauteile am stärksten erwärmen und am Abend, sobald die Bauteile wieder abkühlen. Somit sind zumindest zwei Messungen pro Tag empfehlenswert.

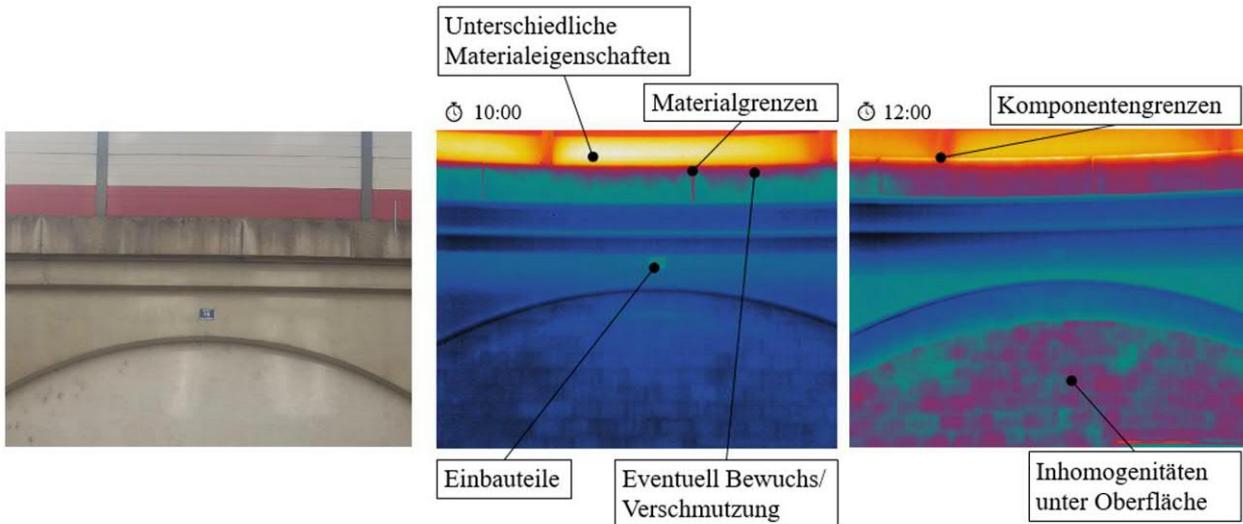


Abbildung 75: Thermografieaufnahmen eines Details der Viaduktgasse um 10:00 und um 12:00

4.3.5 Georadar Plattenversuche

Die Versuche mit Georadar wurden an den Betonplatten mit den Abmessungen 600/600/150 mm durchgeführt. In die untersuchten Betonplatten waren Hohlstellen, Delamination und Bewehrungseisen in unterschiedlichen Tiefenlagen eingebaut (teilweise in der Lage bekannt, teilweise unbekannt). Das Ziel der Versuche war die Detektion von Hohlstellen, Delamination und der Bewehrungslage mittels dem GPR Live der Firma Proceq. Das Gerät wird manuell bedient und über dabei über den Probekörper in Messtreifen geführt. Als Bedienungsscreen für weitere Einstellungen dient ein iPad mit installierter zugehöriger App. Mit dieser App werden die Aufnahmen in Echtzeit angezeigt und können später nachbearbeitet werden (Abbildung 76). Das GPR Live kann bei trockenem Beton eine Messtiefe bis zu 70 cm erreichen.



Abbildung 76: GPR Live mit Rastervorlage zur Aufnahme der Betonplatten

Die Oberflächen der Betonprüfkörper wurden für eine systematische genaue Analyse mit einem Raster versehen, siehe Abbildung 77. Eine eindeutige Nummerierung des Rasters erlaubte eine redundante Messung der Platten. Die GPR Aufnahmen folgten streng nach diesem Raster.

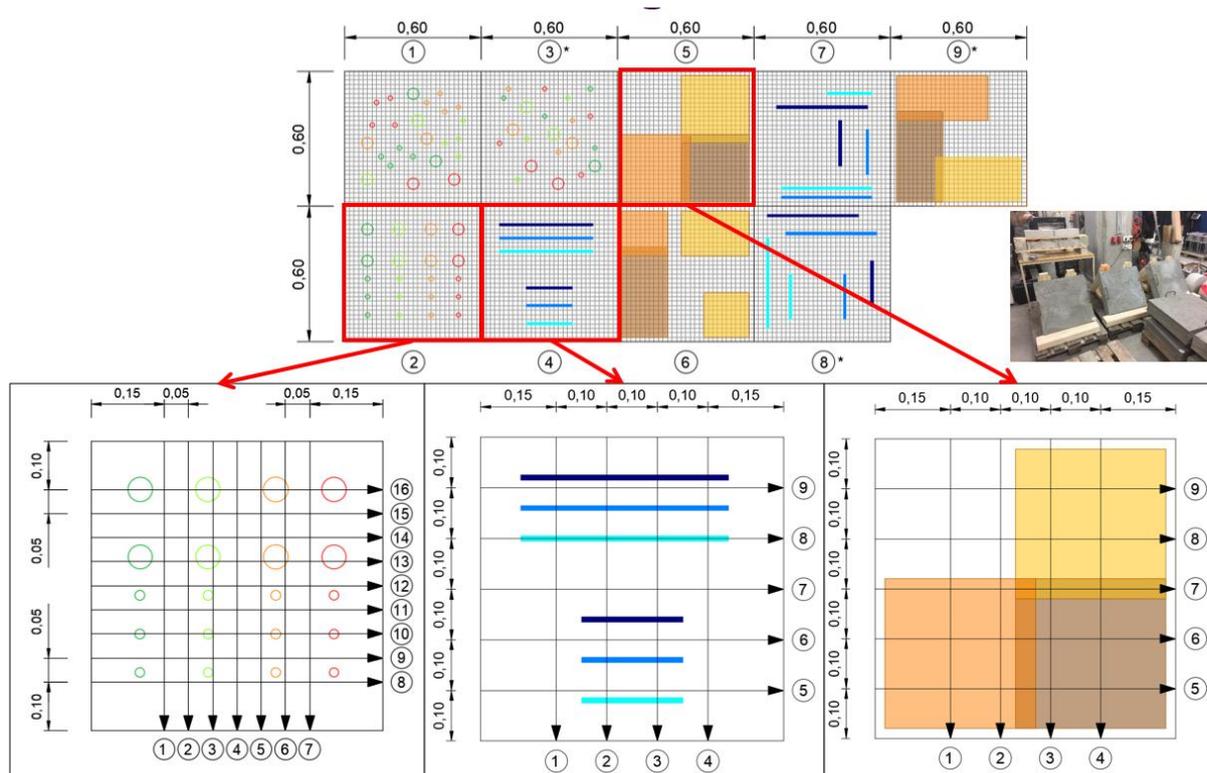


Abbildung 77: Betonprüfkörper mit Raster system für die Aufnahmen der Betonplatten mit GPR Live

Das für die Bewehrungsdetektion konzipierte GPR Gerät GPR Live zeigte für alle in den Platten verlegten Bewehrungslagen bis zu einer Tiefe von 10 cm eine sehr gute Detektierbarkeit (Abbildung 78 links). Die vom Anbieter des Gerätes beworbene 3D Darstellung der Bewehrungslagen konnte bei diesen Messungen aufgrund der geringen Abmessungen nicht erreicht werden. Die Detektion der Hohlstellen in den Platten mittels GPR war nicht erfolgreich. Wie in Abbildung 78 (mitte) ersichtlich, wurden zwar Störungen aufgezeichnet, allerdings war die Detektion aufgrund der kleinen Durchmesser der Hohlräume nur bis 3 cm Tiefe möglich. Zudem kann mittels Georadars nicht festgestellt werden, welche Größe die Hohlräume haben.

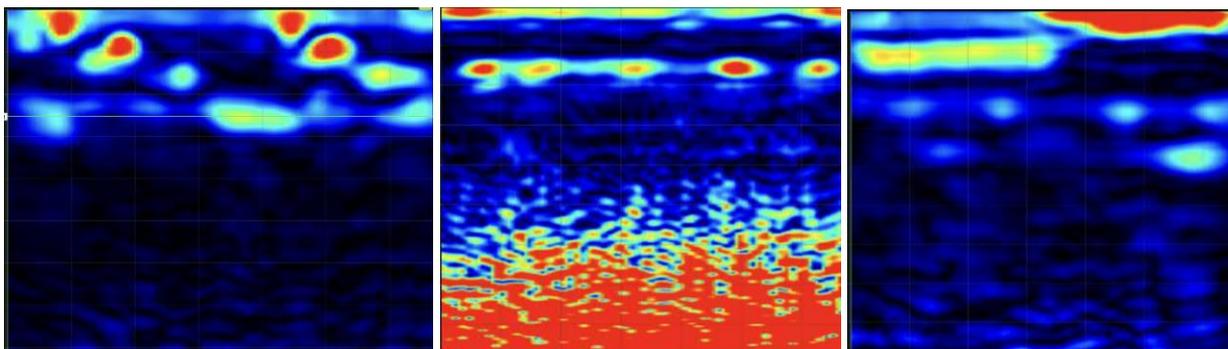


Abbildung 78: Georadarmessung von Plattenoberseite der Platte 4 mit Bewehrungsstäben, der Platte 2 mit Hohlstellen (Mitte) und der Platte 5D mit Delamination (rechts) laut Abbildung 77

Die GPR Live Messungen zur Detektion der Delamination zeigten sehr gute Resultate bis zu einer Tiefe von 10 cm, wie in Abbildung 78 (rechts) erkennbar. Weitere Aufnahmen sowie das Messprotokoll sind dem Anhang 10.5.3 zu entnehmen.

4.3.6 Hyperspektralanalysen

Hyperspektralanalysen dienen vor allem der Analyse von Oberflächen. Bei diesen Untersuchungen war es von primärem Interesse die Karbonatisierung und Chlorid auf der Oberfläche zu detektieren. Das verwendete Messsystem (siehe Abbildung 79) besteht aus einer Xenics NIR (Nahinfrarot) Kamera, einem Specim N17E Spektrograph betrieben im Wellenlängenbereich zwischen 900 und 1700 nm, einer Beleuchtung aus Halogenlampen und einem mit Schrittmotor betriebenen Auflagetisch. Als Testkörper kamen Würfel mit einer Abmessung von 10/10/10 cm zur Anwendung.



Abbildung 79: Aufbau Hyperspektralkamera vom Institut für Holzforschung

Ziel der Versuche war (a) die Chloridkonzentrationen auf der Oberfläche von Beton über die hyperspektrale Signatur zu detektieren, und (b) die Effekte der Karbonatisierung von Beton auf der Oberfläche zu charakterisieren. In diesem Zusammenhang war auch das Ausmaß der Chloridkonzentration von großem Interesse. In der Versuchsreihe zur Detektion der Chloridkonzentration mittels Hyperspektralanalyse die Flächen der Betonproben mit Chloridlösungen unterschiedlicher Konzentrationen besprüht.

Die Hyperspektralanalyse erfolgte mittels der PLS Matlab Toolbox. Es wurden Dateien mit den Reflexionen aller Wellenlängen von sämtlichen aufgenommenen Pixeln gemittelt und in ein Excelformat exportiert. Dieser Prozess erlaubte die Ergebnisse übersichtlich mittels Grafiken zu veranschaulichen. Die erhaltenen Grafiken zeigen die Reflexionsintensität in Abhängigkeit von der entsprechenden Wellenlänge (siehe Abbildung 80) Der erhaltene Verlauf des Spektrums wird als spektrale Signatur der aufgenommenen Oberfläche bezeichnet.

Beim Vergleich der spektralen Signaturen der Oberflächen mit den unterschiedlichen Chloridkonzentrationen (Abbildung 80) konnte festgestellt werden, dass die Reflexionsintensität der Oberflächen mit steigender Chloridkonzentration niedriger wird. Dies zeigt die Möglichkeit auf Chlorid auf der Betonoberfläche nachzuweisen bzw. eventuell auch die Konzentration zu bestimmen. Eine fundierte verifizierte Aussage über den tatsächlichen Chloridgehalt benötigt noch weitere vertiefte Untersuchungen. Zusammenfassend sind regelmäßige Aufnahmen der Oberfläche mit Hyperspektralsensoren geeignet, verändern der Chloridkonzentration zu detektieren.

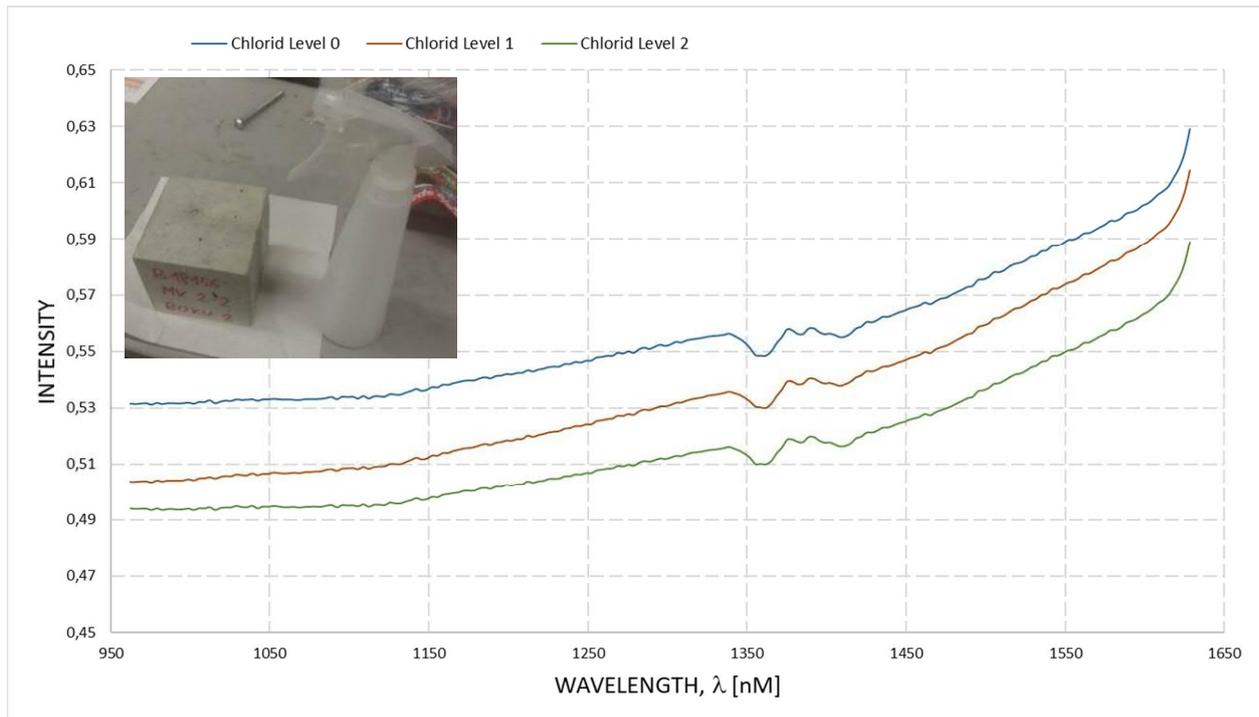


Abbildung 80: Spektrale Signaturen von Betonoberflächen ohne Chloridbeaufschlagung (blau), mit geringer Chloridkonzentration (rot) und mit hoher Chloridkonzentration (grün)

In einer weiteren Versuchsserie wurden karbonatisierte Betonproben untersucht. Abbildung 81 zeigt die spektrale Signatur des karbonatisierten und des intakten Bereiches. In der Praxis werden in der Regel Phenolphthaleinlösungen verwendet, um Karbonatisierung am Beton festzustellen. Verfärbt sich der Beton im besprühten Bereich violett, bedeutet das, dass dieser nicht karbonatisiert ist. Die spektrale Signatur des intakten Bereiches zeigte im Wellenlängenbereich zwischen 1350 und 1450 nM einen sehr ausgeprägten Verlauf, der sich deutlich vom Verlauf des karbonatisierten Bereichs unterscheidet. Die Analyse der Karbonatisierung mittels Hyperpektralmessungen zeigt ein hohes Potential. Für einen praxisnahen Einsatz sind jedoch noch weitere Untersuchungen notwendig. Für die praktische Anwendung werden ebenso wie für die Bestimmung der Chloridkonzentration mehrere Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten empfohlen, um anhand von Vergleichswerten auf Veränderungen schließen zu können. Weitere Auswertungen und Ergebnisse zur Hyperspektralanalyse in den Laborversuchen können dem Anhang 10.5.4 entnommen werden.

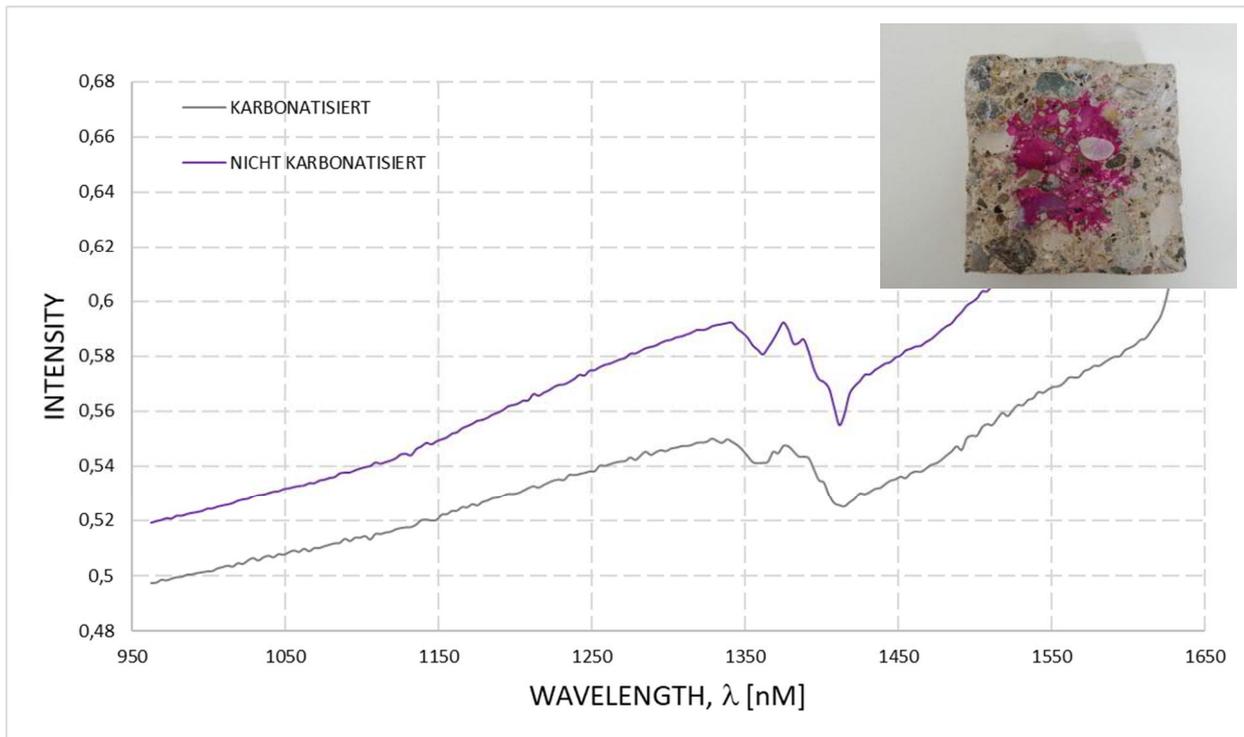


Abbildung 81: Spektrale Signatur von karbonatisiertem Beton (grau) und von intaktem Beton (violett)

4.4 Detektionswahrscheinlichkeiten und Eignung Messsysteme

4.4.1 Detektionswahrscheinlichkeit der Thermografie

Aus den Ergebnissen des in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Versuchsprogrammes I an Betonkleinkörpern mit Hohlstellen wurde mittels numerischer Verfahren die Probenanzahl und deren Varianten erweitert bzw. erhöht. Dabei wurden Parameter wie die Umgebungstemperatur, die Temperatur des Betonkörpers und die Temperatur im Bohrloch variiert. Anhand der simulierten Wärmeströmung im Betonkörper konnten die Temperaturen an der Oberfläche während der Abkühlphase abgelesen werden. Die Temperaturverläufe an der Oberfläche zeigen klare Veränderungen vor allem im Bereich der oberflächennahen Bohrlöcher (siehe Abbildung 82).

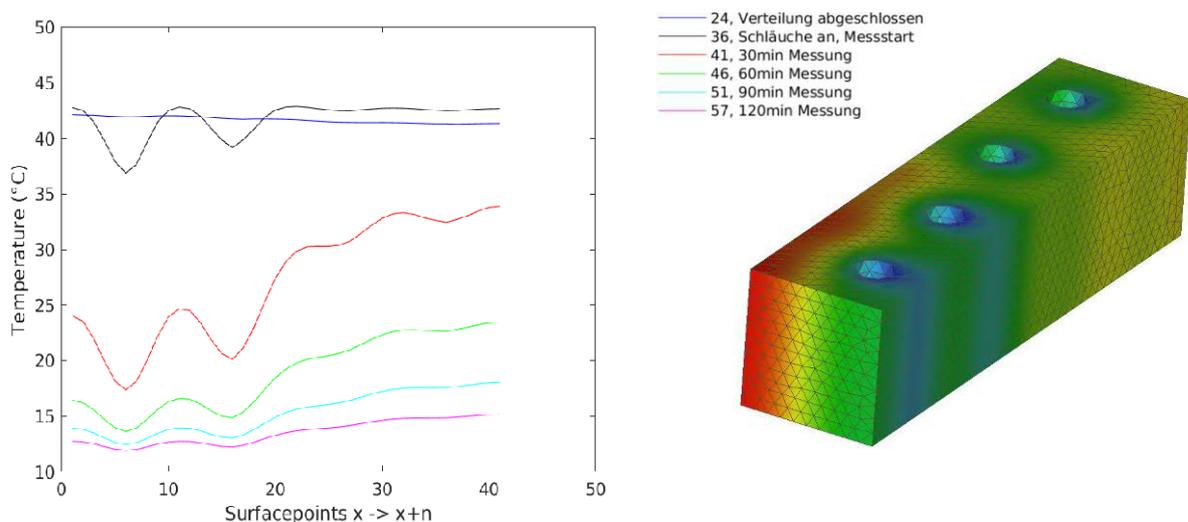


Abbildung 82: Oberflächenanalysen der modellierten Betonkörper, TK = 50°C; Umgebung, TU = 25°C, Bohrung, TB = 12°C; Bohrung, d=25mm

Die Ermittlung der Detektionswahrscheinlichkeit (POD – Probability of Detection) für Hohlräume im Beton erfolgte auf Basis der Ergebnisse aus den numerischen Simulationen. Bei der Berechnung der Detektionswahrscheinlichkeit wird davon ausgegangen, dass die Möglichkeit für eine Detektion nur dann besteht, wenn ein gewisser Temperaturunterschied zwischen intaktem und geschädigtem Bereich auftritt (siehe Abbildung 83 links). Überschneiden sich die Werte der beiden Bereiche, kann der Schaden nicht detektiert werden (siehe Abbildung 83 rechts). Die Überschneidungsfläche ist in Abbildung 1 als „PD“ eingezeichnet. Die Detektionswahrscheinlichkeit ergibt sich somit aus: $POD=1-PD$.

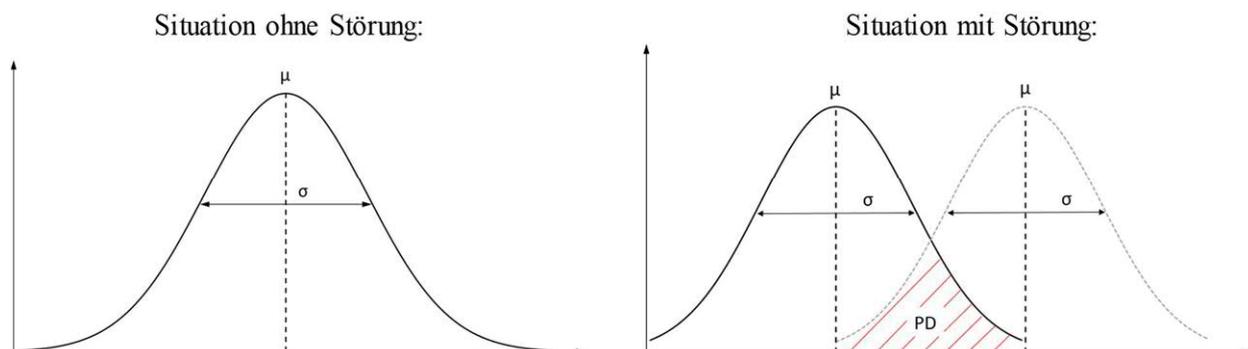


Abbildung 83: Ermittlung der Detektionswahrscheinlichkeit (POD – Probability of Detection)

Tabelle 44 und Tabelle 45 zeigen die ermittelten Detektionswahrscheinlichkeiten der Hohlräume in unterschiedlichen Tiefenlagen. Es wurden verschiedene Beton-, Umgebungs- und Hohlraumtemperaturen und der Beobachtungszeit ab Abkühlen des Betonkörpers analysiert. Berechnet wurde die POD für den Zeitpunkt 10 bzw. 20 min nach Abkühlung des Betonkörpers. Die POD ist bei hoher Wahrscheinlichkeit (70-100%) grün, bei einer Wahrscheinlichkeit von 50-70% gelb, bei 30-50% orange und bei niedriger Wahrscheinlichkeit mit 0-30% rot markiert.

Tabelle 44: Detektionswahrscheinlichkeit Thermografie bei unterschiedlichen Temperaturen und Bohrlochtiefen nach einer Beobachtungszeit von 20 min

POD 70-100%
 POD 50-70%
 POD 30-50%
 POD 0-30%

POD borehole 25 mm Observation period 20 min		Temperature Concrete Sample														
		12			20			25			35			50		
		Temperature Borehole														
Ambient Temperature	Borehole	12	18	24	12	18	24	12	18	24	12	18	24	12	18	24
10	depth=15mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,3-0,5	0,3-0,5	0,5-0,7	0-0,3	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1
	depth=30mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,3-0,5	0,3-0,5	0,5-0,7	0-0,3	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1
	depth=45mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,3-0,5	0,3-0,5	0,5-0,7	0-0,3	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1
	depth=60mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,3-0,5	0,3-0,5	0,5-0,7	0-0,3	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1
25	depth=15mm	0,17	0,5-0,7	0,5-0,7	0,52	0,32	0,21	0,76	0,44	0,32	0,82	1,00	0,48	0,98	0,86	0,79
	depth=30mm	0,24	0,5-0,7	0,5-0,7	0,64	0,38	0,20	0,77	0,47	0,30	0,93	0,71	0,52	0,98	0,93	0,79
	depth=45mm	0,29	0,5-0,7	0,5-0,7	0,65	0,43	0,19	0,75	0,56	0,35	0,91	0,74	0,56	0,98	0,86	0,80
	depth=60mm	0,25	0,5-0,7	0,5-0,7	0,62	0,42	0,22	0,74	0,55	0,36	0,93	0,66	0,50	0,95	0,83	0,71
40	depth=15mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,7-1	0,5-0,7	0-0,3	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,99	0,95	0,5-0,7
	depth=30mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,7-1	0,5-0,7	0-0,3	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,98	0,96	0,5-0,7
	depth=45mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,7-1	0,5-0,7	0-0,3	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,97	0,95	0,5-0,7
	depth=60mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,7-1	0,5-0,7	0-0,3	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,95	0,89	0,5-0,7

Tabelle 45: Detektionswahrscheinlichkeit Thermografie bei unterschiedlichen Temperaturen und Bohrlochtiefen nach einer Beobachtungszeit von 10 min

POD 70-100%
 POD 50-70%
 POD 30-50%
 POD 0-30%

POD borehole 25 mm Observation period 10 min		Temperature Concrete Sample														
		12			20			25			35			50		
		Temperature Borehole														
Ambient Temperature	Borehole	12	18	24	12	18	24	12	18	24	12	18	24	12	18	24
10	depth=15mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,3-0,5	0,3-0,5	0,5-0,7	0-0,3	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1
	depth=30mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,3-0,5	0,3-0,5	0,5-0,7	0-0,3	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1
	depth=45mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,3-0,5	0,3-0,5	0,5-0,7	0-0,3	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1
	depth=60mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,3-0,5	0,3-0,5	0,5-0,7	0-0,3	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,7-1	0,7-1
25	depth=15mm	0,40	0,5-0,7	0,5-0,7	0,99	0,61	0,10	1,00	0,91	0,39	1,00	0,52	0,90	1,00	1,00	1,00
	depth=30mm	0,40	0,5-0,7	0,5-0,7	0,98	0,56	0,12	1,00	0,86	0,36	1,00	0,89	0,7-1	1,00	1,00	1,00
	depth=45mm	0,29	0,5-0,7	0,5-0,7	0,71	0,39	0,19	0,82	0,59	0,33	0,96	0,75	0,53	0,93	0,88	0,76
	depth=60mm	0,34	0,5-0,7	0,5-0,7	0,65	0,40	0,18	0,76	0,52	0,32	0,93	0,66	0,50	0,86	0,83	0,69
40	depth=15mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,7-1	0,5-0,7	0-0,3	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	1,00	1,00	0,5-0,7
	depth=30mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,7-1	0,5-0,7	0-0,3	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	1,00	1,00	0,5-0,7
	depth=45mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,7-1	0,5-0,7	0-0,3	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,58	0,45	0,5-0,7
	depth=60mm	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,5-0,7	0,3-0,5	0-0,3	0,7-1	0,5-0,7	0-0,3	0,7-1	0,7-1	0,5-0,7	0,43	0,30	0,5-0,7

In Abbildung 84 sind die Detektionswahrscheinlichkeiten für Bohrlöcher in unterschiedlicher Tiefe beispielhaft für eine Temperatursituation in Abhängigkeit von der Beobachtungszeit (zwischen 10 und 30 min) dargestellt. Die umfangreichen Auswertungen finden Sie auf dem beigelegten Datenträger.

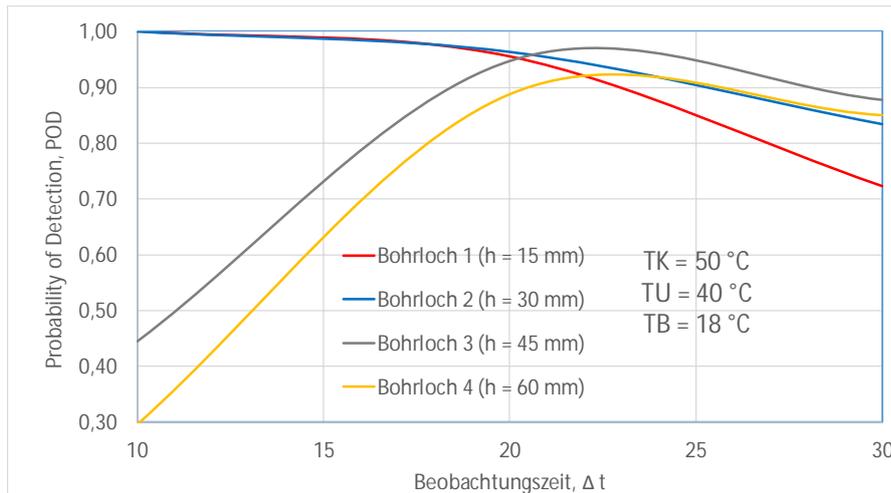


Abbildung 84: POD – Probability of Detection der vier Bohrlöcher bei einer Umgebungstemperatur von 40°C, einer Betontemperatur von 50°C und einer Bohrlochtemperatur von 18°C in Abhängigkeit von der Beobachtungszeit

4.4.2 Detektionswahrscheinlichkeit zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden

Die zerstörungsfreie Detektion von Schäden im Beton kann durch eine Vielzahl unterschiedlicher Geräte unterstützt werden. Dazu stehen Geräte wie Georadar, Ultraschallgeräte, Bewehrungssucher und Geräte zur Prüfung von Korrosionspotential, Betonwiderstand und Permeabilität zur Verfügung. Tabelle 46 und Tabelle 47 geben eine Übersicht über die Anwendungsmöglichkeiten ausgewählter Geräte, die für die Untersuchung von Betonstrukturen relevant sind.

Ausgangspunkt für die Wahl der Geräte (siehe Anhang 10.5.5) waren die Empfehlungen eines Anbieters von Messinstrumenten für zerstörungsfreie Testverfahren. Die Wahrscheinlichkeit der Detektion der aufgelisteten Eigenschaften bzw. Schadensbilder wurde mit der Probability of Detection (POD) in vier Stufen in den Farben Grün (die Detektionswahrscheinlichkeit liegt bei 70-100%), Gelb (50-70%), Orange (30-50%) und Rot (0-30%) angegeben. Ein Auszug aus der Übersichtstabelle aus Anhang 10.5.5 ist in Tabelle 46 dargestellt.

Tabelle 46: Anwendungsübersicht von Geräten zur zerstörungsfreien Detektion von Schäden und Eigenschaften von Beton auf Basis der Angaben von zerstörungsfreien Messgeräteanbietern und der Laboruntersuchungen der Universität für Bodenkultur (Auszug aus Tabelle im Anhang 10.5.5)

	Tragbares Bodenradar - Proceq GPR Live	Pundit Ultraschall-Impulsgeschwindigkeit und Impuls-Echo-Tomografie				
		Pundit Live Array Pro	Pundit Lab(+)	Pundit 200	Pundit 200 Pulse Echo	Pundit 250 Array
Location of grouting defects in tendon ducts	●	●	●	●	●	●
Bestimmung der Impulsgeschwindigkeit	●	●	●	●	●	●
Beurteilung der Qualität	●	●	●	●	●	●
Ermittlung der Druckfestigkeit	●	●	Pundit Lab+ only	●	●	●
Elastizitätsmodul	●	●	●	●	●	●

Die Bewertungsmatrix der Tabelle 47 basieren auf den Laboruntersuchungen der Universität für Bodenkultur, einer Literaturrecherche und einer ersten Expertenrunde des fib AG9 Ausschusses. Die in Tabelle 47 erzeugten Ergebnisse werden in Folge von weiteren Expertengremien der non destructive testing (ndt) Community geprüft und bei Bedarf angepasst, auch in Bezug auf die zuvor beschriebene Detektionswahrscheinlichkeit.

Tabelle 47: Anwendungsübersicht von Geräten zur zerstörungsfreien Detektion von Schäden und Eigenschaften von Beton (Einschätzung BOKU) (Auszug aus Tabelle im Anhang 10.5.5)

	Tiefe	Tragbares Bodenradar - Proceq GPR Live	Pundit Ultraschall-Impulsgeschwindigkeit und Impuls-Echo-Tomografie				
			Pundit Live Array Pro	Pundit Lab(+)	Pundit 200	Pundit 200 Pulse Echo	Pundit 250 Array
Delamination	2 cm	●	●		●	●	
	5 cm	●	●		●	●	
	10 cm	●	●		●	●	
Bewehrung	2 cm	●					
	5 cm	●					
	10 cm	●					
Hohlstellen (Ø mind. 5 cm)	3 cm	●	●		●	●	
	6 cm	●	●		●	●	
	9 cm	●	●		●	●	
	12 cm	●	●		●	●	

4.5 Ergebnisse und Empfehlungen

4.5.1 Detektion von Schäden und Schadensbildern mittels Thermografie

Die Thermografie eignet sich für die Detektion von Delamination und Hohlstellen unter bestimmten Umweltbedingungen. Voraussetzung für die Detektion dieser Schäden ist ein Temperaturunterschied zwischen Bauwerk und Umgebung, wodurch die Schadstellen während der Aufwärm- bzw. Abkühlphase des Bauteils aufgenommen werden können. Die Erkennung der Schäden ist signifikant von der Sonneneinstrahlung auf das Bauwerk abhängig. Empfehlenswert ist es, die Thermografieaufnahmen zwischen 11:00 und 14:00, wenn sich das Bauwerk am stärksten erwärmt, bzw. nach Sonnenuntergang zwischen 18:00 und 24:00, wenn das Bauwerk wieder abkühlt durchzuführen, da sich in diesen Zeiträumen die Schäden am deutlichsten abzeichnen. Hohlstellen und Delamination können am besten durch mehrmalige Aufnahmen des Bauteiles über den Tag festgestellt werden, da dann die Temperaturveränderungen in ihrem vollen Umfang beobachtet werden können.

Die Aufnahmen der Italienschleife und der Bahnbögen der Viaduktgasse zeigen, dass Materialinhomogenität, Materialgrenzen, Einbauteile sowie Verschmutzung und Bewuchs sehr gut detektierbar sind. Unter feuchten Bedingungen können zudem Risse sehr gut erkannt werden. Die Aussagen zu geeigneten Erhebungszeiträumen gelten wie zuvor.

Die Thermografie ist sowohl für „punktuelle“ Detailaufnahmen von neuralgischen Bereichen als auch für flächendeckende Aufnahmen vom gesamten Bauwerk geeignet. Für die Aufnahme des gesamten Bauwerks eignet sich der Einsatz von UAV. Thermografie-Sensoren werden speziell für die Anwendung auf UAV hergestellt. Die Entfernung von ca. 3 m erlaubt bereits eine sehr gute Detektierbarkeit von Schäden und Merkmalen. Somit ist der Drohneneinsatz ohne Limitierung möglich. Die Datenmengen können umfangreiche intensive Auswertungen verursachen. Mittels neuronaler Netzwerke sowie AI können der Detektionsaufwand und Speicherbedarf reduziert sowie die Objektivität der Bewertung gesteigert werden.

Eine umfangreiche Literaturrecherche zeigt, dass noch allgemein gültige Algorithmen für die Schadensdetektion mittels Thermografie vorhanden sind. Die Entwicklung erscheint aber auf Basis der geschaffenen Grundlagen und Erfahrungen möglich. siehe Fritsch 2019 (siehe https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.person_wissenstransfer?sprache_in=de&menue_id_in=106&id_in=5010). Weiterführende Informationen zum Thema Thermografie sind in der Diplomarbeit „Thermografische Zustandserfassung von Betonstrukturen mit Hochleistungsdrohnen“ von Mathis Auer zu finden (https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.person_betreuungen?sprache_in=de&menue_id_in=107&id_in=5010).

4.5.2 Georadar

Georadar eignet sich für die Bestimmung der Bewehrungslage. Aus den Versuchen hat sich gezeigt, dass mittels Georadar Delamination im Beton, flächige Materialveränderungen, wie zum Beispiel unterschiedliche Schichten im Straßenaufbau detektiert werden können. Für Hohlstellen mit einem Durchmesser kleiner als 4 cm zeigt sich Ultraschall als geeignetere Methode.

Die genannten Geräte (Georadar, Ultraschall, Permeabilitätsmessgerät, ...) sind durchwegs für die zerstörungsfreie Schadensdetektion geeignet, allerdings ist für diese Methoden ein direkter Kontakt zur Oberfläche erforderlich. Die Anwendung der im Test eingesetzten Geräte mittels

UAV ist daher nicht sinnvoll möglich. Generell wurden für andere Einsätze sowohl Ground Penetrating Radar (GPR) als auch Synthetic Aperture Radar (SAR) auf UAS erfolgreich eingesetzt, allerdings nicht für die Detektion von Schäden im Beton auf Brückebauwerken. Da Georadar, Ultraschall etc. weniger von den Umweltverhältnissen wie zum Beispiel von der Temperatur abhängig sind, ist die Methode vor allem für Einsatzbereiche zu empfehlen, bei denen die Thermografie aufgrund von fehlender Sonneneinstrahlung bzw. Verschattung versagt. Zu beachten ist, dass die Feuchtigkeit aufgrund der starken Reflexion von Wasser einen bedeutenden Einfluss auf die Messergebnisse mit Georadar hat und mögliche darunterliegende Schadensmerkmale abschirmen kann. Die Anwendung von Georadar ist daher bei trockenen Verhältnissen zu empfehlen.

Die Messung mit Georadar erfolgt weiters manuell. Daher werden in der Regel stichprobenartig kleinere Bereiche am Bauwerk untersucht, bei denen die Untersuchung der unter der Oberfläche liegenden Merkmale von Interesse ist. Hinsichtlich der Beobachtungshäufigkeit ist eine einmalige Aufnahme in den vorgesehenen Prüfindervallen ausreichend, um Störungen im Bauwerk zu erkennen. Die Auswertung erfolgt im Falle des GPR Live manuell über die vom Gerät bereitgestellte App.

4.5.3 Hyperspektralanalysen

Die Hyperspektralaufnahme ist eine vielversprechende Methode, um kontaktlos und zerstörungsfrei Chloridkonzentrationen und Karbonatisierung auf der Oberfläche von Beton zu detektieren. Die Feststellung der Änderung der Chloridkonzentration und der Karbonatisierung der Oberfläche von Beton bedarf einer periodischen Wiederholung, um Veränderung zu aktuellen Aufnahmen referenzieren zu können. Weiters wird eine Erstaufnahme der unbelasteten Betonoberfläche dringend empfohlen. In weiterer Folge reichen punktuelle stichprobenartige Messungen zur Detektion der Veränderungen an relevanten Stellen in der Regel aus.

Weitere Schäden am Bauwerk, die mittels der hyperspektralen Bildgebung gut erkannt werden können, sind Materialinhomogenitäten sowie Verschmutzung und Bewuchs. Für die Detektion dieser Schäden ist eine einmalige Untersuchung ausreichend, aber auch hier sind jedoch Vergleichsmessungen hilfreich, um Veränderungen am Bauwerk festzustellen. Hinsichtlich der Umweltbedingungen gibt es wenig bekannte Einschränkungen. Es ist lediglich zu empfehlen die Messung bei trockenen bzw. bei ähnlichen Verhältnissen im Zuge der regelmäßigen Untersuchungen durchzuführen. Dies ist vor allem deshalb empfehlenswert, da sich Wasser sehr stark in der spektralen Signatur abzeichnet und dadurch die Messergebnisse verfälschen kann.

Die Durchführung der Hyperspektralaufnahmen ist je nach Wahl des Aufnahmegepärs sowohl manuell als auch mittels UAV möglich. Auf Basis der Laborversuche (Spektralbereich 900-1700 nm) wird für die Inspektion von Beton mittels Hyperspektralanalyse ein Kamerasystem mit einem Spektralbereich zwischen 1300-1500 (Wasserphase) empfohlen. Weiterführende Untersuchungen könnte es ermöglichen die Detektion und Erfassung weiterer Schadensmerkmale auszuloten (Sinterungen, Abplatzungen, Feuchtstellen, ...).

4.5.4 Zusammenfassung

Aus den Laborversuchen im Forschungsprojekt RISKMON lassen sich für die untersuchten Verfahren folgende Erkenntnisse ableiten:

Thermokamera: Mehrmalige *Thermokamera*-Beobachtungen während eines Tages (auch während eines Jahres) erlauben unter den im Forschungsbericht spezifizierten Umweltbedingungen die Detektion der folgenden Schäden

- Delaminierungen in Betonstrukturen in einer Tiefe von 5 cm.
- Delaminierungen in Betonstrukturen in einer Tiefe von 10 cm mit einer mittleren Wahrscheinlichkeit.
- Hohlräume mit Durchmesser 2cm, Tiefe 2cm mit einer mittleren Wahrscheinlichkeit
- Hohlräume mit Durchmesser 2cm, Tiefe 4cm mit einer geringen Wahrscheinlichkeit
- Risse (vor allem bei feuchten Verhältnissen) mit einer hohen Wahrscheinlichkeit
- Materialinhomogenitäten mit einer hohen bis mittleren Wahrscheinlichkeit
- Einbauteile mit einer hohen bis mittleren Wahrscheinlichkeit

Hyperspektralanalyse: Mehrmalige *Hyperspektral*-Beobachtungen erlauben unter bestimmten Umweltbedingungen die Detektion der folgenden Schäden bzw. Materialparameter

- Die Entwicklung der Chloridoberflächenkonzentration mit einer hohen Wahrscheinlichkeit.
- Die Chloridkonzentration mit einer mittleren Wahrscheinlichkeit.
- Die Karbonatisierung an der Oberfläche mit einer hohen Wahrscheinlichkeit.
- Die Entwicklung der Karbonatisierung mit einer mittleren Wahrscheinlichkeit.
- Die Festigkeitsentwicklung mit einer hohen Wahrscheinlichkeit.
- Die Feuchteentwicklung mit einer hohen Wahrscheinlichkeit.
- Spuren von Bewuchs mit einer hohen Wahrscheinlichkeit.
- Die Sinterungsentwicklung mit einer hohen Wahrscheinlichkeit.

Georadar: Die Anwendung von *Georadar* ist derzeit kontaktlos zwar grundsätzlich möglich, im Bereich von Brückenbauwerken wird diese aber für Anwendungen empfohlen, für die Thermografie und Hyperspektralanalysen weniger geeignet sind. Die Messung mit Georadar erlaubt die Erfassung folgender Schäden

- Die Detektion der Bewehrungslage mit einer hohen Wahrscheinlichkeit.
- Die Erfassung von Delamination mit einer hohen Wahrscheinlichkeit.
- Die Erfassung von Materialinhomogenitäten und von Störstellen mit einer mittleren Wahrscheinlichkeit.

Zusammenfassend und zur besseren Veranschaulichung der Detektionsmöglichkeiten der verschiedenen Sensoren dient die in Tabelle 48 dargestellte Übersicht. Sie zeigt die Einsatzbereiche von Thermografie, Hyperspektralsystemen, Georadar Systemen sowie Orthofoto und Laserscan. Thermografie und Orthofotoaufnahmen eignen sich für die Erfassung von Schäden an der Oberfläche. Die Thermografie bietet darüber hinaus die Möglichkeit Delamination und Hohlräume zu erfassen. Durch den Einsatz Hyperspektral- und Georadarsystemen sowie dem Laserscan können weitere Schadensmerkmale abgedeckt werden. Die Tabelle zeigt, dass die Anwendung der getesteten Sensoren durch ihre unterschiedlichen Eigenschaften eine umfassende Schadensanalyse

erlauben und entsprechend ihrer Detektionsmöglichkeiten für verschiedenste Bereiche angewandt werden können.

		Thermografie		Hyperspektral Systeme	Georadar Systeme	Orthophoto	Laserscan
		FLIR Vue Pro 640 R	FLIR E60	z.B. SWIR M384	Proceq GPR Live	mind. 36 Megapixel Kamera	z.B. miniVUX-1UAV VUX-1 UAV
	Tiefe						
Delamination	bis 10 cm	●	●				
Hohlräume, Ø 2cm	bis 2 cm	●●	●●				
Hohlräume, Ø 2cm	bis 4 cm	●	●				
Risse (feuchte Verhältnisse) > 0,2 mm	-	●	●			●	
Materialinhomogenitäten / Materialgrenzen	-	●	●		●●	●	
Verschmutzung / Bemalung	-	●	●			●	
Nester, Fehlstellen, Abplatzungen	-	●	●			●	
Ausblühungen, Nassstellen, Sinterfahnen	-	●	●			●	
Einbauteile	-	●	●			●	
Karbonatisierung	-			●			
Oberflächen Chloridkonzentration	-			●●			
Materialinhomogenitäten / Materialgrenzen	-			●			
Verschmutzung / Bemalung	-			●			
Bewehrungslage	-				●		
Überdeckung	-				●		
Delamination	bis 10 cm				●		
Geometrie	-					●	●
Verformungen	-					●	●●
Änderungen	-					●	●

Legende ● überwiegend prüfbar ● teilweise prüfbar ● überwiegend nicht prüfbar

Tabelle 48: Übersichtstabelle Schadensmerkmale Beton und Sensoreignung für die Detektion

Aus den Laborversuchen, den numerischen Untersuchungen, den Vorortuntersuchungen als auch aus den internationalen Expertenbefragungen wurden die in Tabelle 48 gezeigten Detektionswahrscheinlichkeiten für Thermografie, Hyperspektralanalysen, Georadar, Orthofoto und Laserscan entwickelt. In dieser Tabelle findet man in der ersten Spalte die häufigen Schadensarten und in den ersten beiden Zeilen die Verfahren bzw. die Gerätetypen.

Folgendes Bewertungsschema wurde in der Tabelle verwendet:

- Grün = überwiegend prüfbar
- Gelb = teilweise prüfbar
- Rot = überwiegend nicht prüfbar

In Tabelle 49 sind die detektierbaren Schadensmerkmale mittels der jeweiligen untersuchten Messsysteme aufgelistet (linke Spalte). Zusätzlich sind deren Beobachtungshäufigkeit, die Messdistanz zum Objekt, die Detektionswahrscheinlichkeit und die Umweltbedingungen angegeben. Die Tabelle beinhaltet außerdem Angaben zu entsprechenden Geräten, der Anwendungsmöglichkeit mit UAV, sowie mögliche Visualisierungen und das Datenformat.

Tabelle 49: Detailtabelle Schadensmerkmale Beton, Sensoren und Sensoreignung für die Detektion

Thermografie	Beobachtungshäufigkeit	Distanz	Detektiions-wahrscheinlichkeit	Unterstützung	Umweltbedingungen	Gerät*	Anwendung Drohnen möglich?	Visualisierung	Datenformat
Delamination Tiefen bis 10 cm	mehrmalig pro Tag	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	sonnige Verhältnisse	z.B. FLIR Vue Pro (≥640x480=0,3 MP)	Ja	2D/3D Modell	bmt, thc, thr (nativ) jpg (2D), las-,xyz (3D) obj, fbx (3D) als Textur
Hohlräume, Ø 2cm Tiefen 2 cm	mehrmalig pro Tag	< 3,00 m	mittel hoch	entwickeltes KNN	sonnige Verhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Hohlräume, Ø 2cm Tiefen 4 cm	mehrmalig pro Tag	< 3,00 m	mittel	entwickeltes KNN	sonnige Verhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Risse (feuchte Verhältnisse) > 0,5 mm**	diskret	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	feuchte Verhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Materialinhomogenitäten / Materialgrenzen	diskret	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	sonnige Verhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Verschmutzung / Bemessung	diskret / mehrmalig pro Tag	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	sonnige Verhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Nester, Fehlstellen, Abplatzungen	diskret / mehrmalig pro Tag	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	sonnige Verhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Ausbühlungen, Nassstellen, Sinterfahnen	diskret / mehrmalig pro Tag	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	sonnige Verhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Einbauteile	diskret / mehrmalig pro Tag	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	sonnige Verhältnisse	Ja	2D/3D Modell		
Merkmale: sftp, dwg									
Hyperspektral Systeme	Beobachtungshäufigkeit	Distanz	Detektiions-wahrscheinlichkeit	Unterstützung	Umweltbedingungen	Gerät*	Anwendung Drohnen möglich?	Visualisierung	Datenformat
Karbonatisierung	mehrmalig pro Monat	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	trockene Verhältnisse	z.B. SWIR M384	Ja	3D Modell	raw, rdt, hsz (nativ) jpg, tiff (converted)
Oberflächen Chloridkonzentration	mehrmalig pro Monat	< 3,00 m	mittel hoch	entwickeltes KNN	trockene Verhältnisse		Ja	3D Modell	
Materialinhomogenitäten / Materialgrenzen	diskret	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	-		Ja	3D Modell	
Verschmutzung / Bemessung	diskret	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	-		Ja	3D Modell	
Georadar Systeme	Beobachtungshäufigkeit	Distanz	Detektiions-wahrscheinlichkeit	Unterstützung	Umweltbedingungen	Gerät*	Anwendung Drohnen möglich?	Visualisierung	Datenformat
Bewehrungslage	diskret	0,00 m	hoch	entwickeltes KNN	trockene Verhältnisse	z.B. GPR Live	Nein	App 2D/3D	seg, 2D/3D csv (nativ) jpg (converted)
Überdeckung	diskret	0,00 m	hoch	entwickeltes KNN	trockene Verhältnisse		Nein	App 2D/3D	
Delamination	mehrmalig pro Tag	0,00 m	hoch	entwickeltes KNN	trockene Verhältnisse		Nein	App 2D/3D	
Materialinhomogenitäten / Materialgrenzen	diskret	0,00 m	mittel-gering	entwickeltes KNN	trockene Verhältnisse		Nein	App 2D/3D	
Orthophoto	Beobachtungshäufigkeit	Distanz	Detektiions-wahrscheinlichkeit	Unterstützung	Umweltbedingungen	Gerät*	Anwendung Drohnen möglich?	Visualisierung	Datenformat
Risse (feuchte Verhältnisse) > 0,2 mm**	diskret	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	klare Sichtverhältnisse	für untergeordnete Zwecke min. 24 MP Kamera für professionellen Einsatz mind. 36 Mpixel Kamera	Ja	2D/3D Modell	jpg, tiff (2D), las-,xyz (3D) obj, fbx (3D) als Textur
Materialinhomogenitäten / Materialgrenzen	diskret	< 3,00 m	mittel hoch	entwickeltes KNN	klare Sichtverhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Verschmutzung / Bemessung	diskret	< 3,00 m	mittel hoch	entwickeltes KNN	klare Sichtverhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Nester, Fehlstellen, Abplatzungen	diskret	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	klare Sichtverhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Ausbühlungen, Nassstellen, Sinterfahnen	diskret	< 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	klare Sichtverhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Einbauteile	diskret	< 3,00 m	mittel hoch	entwickeltes KNN	klare Sichtverhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Geometrie	diskret	> 3,00 m	hoch	entwickeltes KNN	klare Sichtverhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Verformungen	diskret	> 3,00 m	mittel	entwickeltes KNN	klare Sichtverhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Änderungen	diskret	> 3,00 m	mittel hoch	entwickeltes KNN	klare Sichtverhältnisse		Ja	2D/3D Modell	
Merkmale: sftp, dwg									
Laserscan (airborne)	Beobachtungshäufigkeit	Distanz	Detektiions-wahrscheinlichkeit	Unterstützung	Umweltbedingungen	Gerät*	Anwendung Drohnen möglich?	Visualisierung	Datenformat
Geometrie	diskret	20-120 m	hoch	entwickeltes KNN	klare Sichtverhältnisse	miniVUX-1UAV VUX-1 UAV	Ja	3D Modell	las-,xyz (nativ) obj, fbx (3D) ohne Textur
Verformungen	diskret	20-120 m	mittel hoch	entwickeltes KNN	klare Sichtverhältnisse		Ja	3D Modell	
Änderungen	diskret	20-120 m	hoch	entwickeltes KNN	klare Sichtverhältnisse		Ja	3D Modell	
Merkmale: wie oben									

*vgl. Sensorübersicht im Hauptbericht für weitere Spezifikationen
**Auflösung abhängig von Sensor, Aufnahmeabstand und Fokussierung bzw. Abtastrate (siehe Hauptbericht)

4.5.5 Ausblick

Die Thermografie stellt eine vielversprechende Methode dar, um Schäden unter der Bauwerksoberfläche zu erkennen. Die Auswertung der Daten erfolgt mangels geeigneter Algorithmen noch manuell. Einsatz und Training künstlicher neuronaler Netze (KNN) würde hier eine effiziente objektivere Bewertung und detailliertere Auswertungen der Messungen ermöglichen. Für die Entwicklung eines entsprechenden KNN ist die Erstellung eines geeigneten Algorithmus und der Aufbau einer ausreichend großen Trainingsdatenbank erforderlich. Die Anwendung eines KNN für die Auswertung von Thermografieaufnahmen setzt eine umfassende Auseinandersetzung mit den Daten und zahlreiche Testläufe voraus, welches nicht Gegenstand des Projektes RISKMON war.

Hyperspektralanalysen stellen eine geeignete Methode für die Feststellung von Veränderungen hinsichtlich Chloridkonzentration und Karbonatisierung auf der Bauwerksoberfläche als auch der Festigkeit des Betons dar. Durch eingehendere Untersuchungen besteht voraussichtlich die Möglichkeit auch quantitative Aussagen zur Chloridkonzentration und Karbonatisierung zu treffen. Grundsätzlich stellen die untersuchten Sensoren vielversprechende Methoden für den Einsatz bei der Inspektion von Bauwerken dar. Auf Basis künftiger Untersuchungen ist zu erwarten, dass die Anwendungsbereiche und die Auswertemöglichkeiten der Daten weiter ausgebaut sowie effektiver und objektiver gestaltet werden können.

Die Anwendung von Georadar ist derzeit nicht kontaktlos möglich, wird aber für Anwendungen empfohlen, für die Thermografie und Hyperspektralanalysen weniger geeignet sind. Die hohe Eindringtiefe und Robustheit machen das Georadar zu einem bereits jetzt weltweit eingesetzten Verfahren in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen. Im Zuge der technologischen Entwicklung ist es zudem vorstellbar, dass ein berührungsloser Ansatz für den Einsatz mit UAS in der Zukunft verfügbar sein wird.

Zusammenfassend ist die berührungslose Zustandserfassung und Auswertung mittels geeigneter, validierter Algorithmen eines der zentralen künftigen Forschungsfelder im Bereich des „Predictive Maintenance“. Voraussetzung für einen breiten Einsatz, nachvollziehbare Analysen und Verwendbarkeit ist eine unabhängige Standardisierung der Sensoren und Methoden sowie Validierung der Ergebnisse. Für die Umsetzung bedeutet dies eine Herausforderungen, die nur gemeinsam von Forschung, Auftraggebern und Anwendungspraxis lösbar ist.

5 Zustandserfassung Bauwerke

5.1 Konzeption Zustandserfassung

Die in Kap. 2.2 beschriebenen Standards der Zustandserfassung basieren in erster Linie auf einer laufenden Überwachung sowie periodischen qualitativen Kontrollen und Prüfungen der Ingenieurbauwerke. Diese werden fallweise ergänzt durch punktuelle Messungen sowie Monitoringssysteme in Ausnahmefällen. Die darauf aufbauende periodische Zustandsbewertung erfolgt ebenfalls rein qualitativ nach dem Schulnotensystem, was für eine unmittelbare Einschätzung eines möglichen Handlungsbedarfes in der Regel ausreichend ist. In Hinblick auf die Detektion von Änderungen, die Ableitung von Zustandsfunktionen und Anwendung in zuverlässigen Zustandsprognosen stoßen diese Ansätze jedoch schnell an ihre Grenzen. Eine mögliche Lösung dafür ist eine lückenlose Dokumentation sowie ein verstärkter Einsatz messtechnischer Verfahren mit weitgehend automatisierter Auswertung der Zustandsdaten.

Um dafür geeignete Verfahren effizient einsetzen zu können und in der Erfassung anfallende Daten effizient aufzunehmen, zu speichern und zu verarbeiten, bedarf es der Entwicklung neuer Herangehensweisen auf den unterschiedlichsten Ebenen. Abbildung 85 zeigt das Konzept der mehrdimensionalen systematischen Zustandserfassung von Hangsicherungen mit bildgebenden Verfahren (Fotogrammetrie, Laserscan) und automatisierter Änderungsdetektion. Für Hangsicherungen, Mauern, Brücken und sonstige Anlagen ist weiters der typische Inspektions-, Kontroll- und Prüfintervall im Lebenszyklus zu beachten. Gemessen an den Lebenszykluskosten von etwa 80-85 €/m²/Jahr betragen die laufenden Kosten einschließlich Kontrollen rund 2 €/m²/Jahr und die externen Prüfungen ebenfalls ca. 1,5-2,5 €/m²/Jahr (Abbildung 86). Mehrausgaben in der Zustandserfassung werden daher sich daher in erster Linie nur dann rechnen, wenn sich daraus bessere Investitionsentscheidungen im Lebenszyklus ergeben. Abbildung 87 zeigt die Konzeption einer mehrdimensionalen systematischen Zustandserfassung von Brücken mit Bauwerksgeometrie (z.B. Laserscan, Fotogrammetrie), Zustand und Deformation sowie Integration in Überwachung, Kontrolle & Prüfung. Schadensausmaß und Schwere können gemäß dem skizzierten Auswahlmenü direkt Elementen zugeordnet und durch Anzeichnen oder entsprechende Algorithmen automatisiert quantifiziert werden. Die Zielsetzung ist eine substantielle Erhöhung der Genauigkeit und Wiederholbarkeit in der Zustandserfassung der Brücken bei begrenztem Zusatzaufwand. Wesentliche Voraussetzung für einen effizienten Einsatz ist daher ein möglichst hoher Grad der Automatisierung in allen Prozessschritten der Datenverarbeitung von der Erfassung und Auswertung bis zur Nachrechnung und Optimierung.

Zusammenfassend ist die messtechnische Erfassung in der Regel aufwendiger, liefert aber eine bessere Basis für Zustandsprognosen und Entscheidungen. Für die beispielhafte Anwendung ist die Auswahl repräsentativer Bauwerke (Brücke, Stützmauer bzw. Hangsicherung) mit einer entsprechenden Anzahl an Schadensmerkmalen und Ausmaß erforderlich. Drohnenflüge können eine Inspektion oder qualifizierte Mitarbeiter nicht ersetzen, erhöhen aber die Zugänglichkeit, in vielen Bereichen auch die Genauigkeit und erlauben eine messtechnische Quantifizierung der erfassten Schäden. Neben der Auswertung typischer Schadensmerkmale sollen der Betonzustand bzw. Feuchtstellen und Gefügeschäden berührungslos flächig erfasst werden (Potenzialfeld, Thermografie, Multigasanalyse). Für eine erfolgreiche Umsetzung ist eine (teil-)Automatisierung mit komfortabler Auswertung und Einbindung der erfassten Zustandsdaten in die Bauwerksmanagementsysteme wesentlich. Der unmittelbare Nutzen liegt in der messtechnischen Erfassung, Wiederholbarkeit und Quantifizierung von Änderungen mit systematischer Dokumentation. Substantielle Effizienzgewinne sind jedoch erst dann erzielbar, wenn auf dieser Datenbasis bessere Entscheidungen erfolgen d.h. Maßnahmenwahl und Timing im Lebenszyklus optimiert werden.

Hangsicherung /Fangnetz ÖBB



Hangsicherung /Stützmauer ASFINAG



(Vor-)auswertung und Schadensdokumentation (ÖBB/ASFINAG)

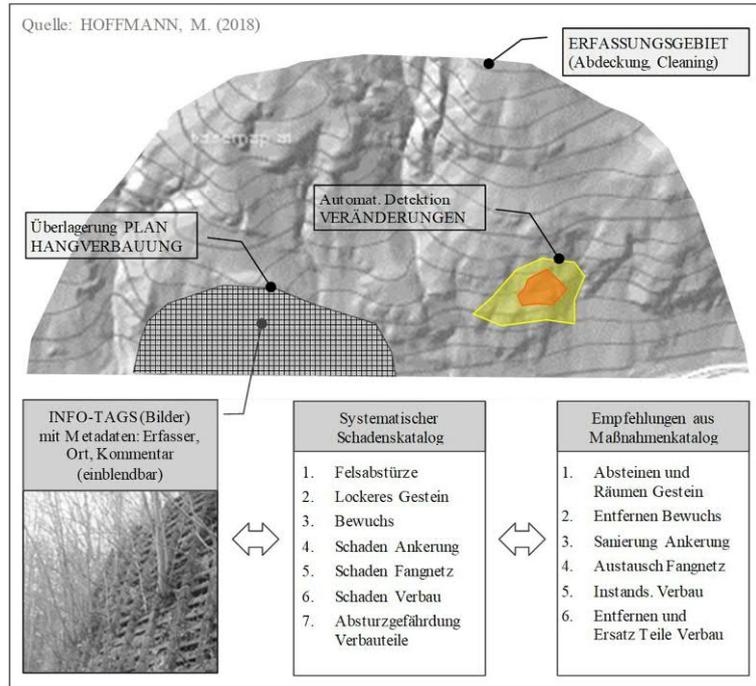
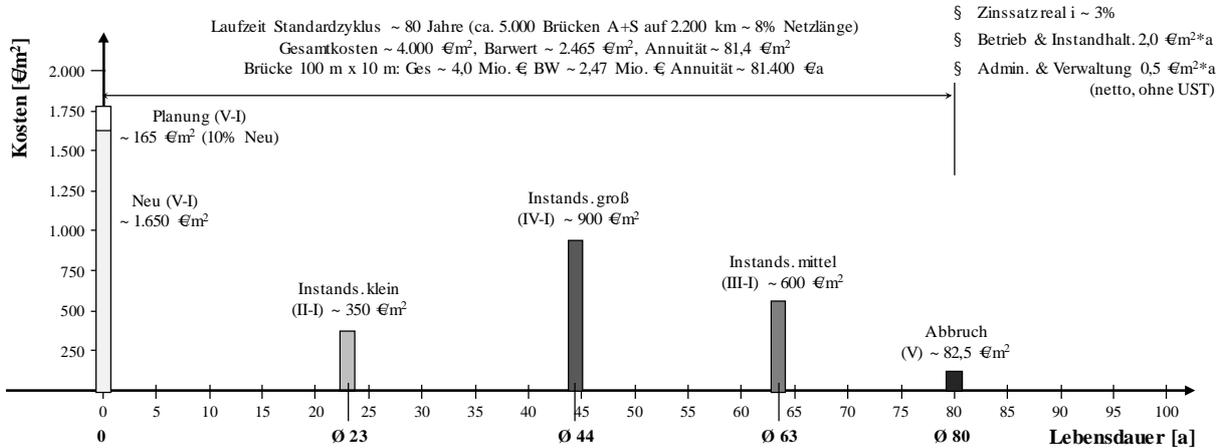
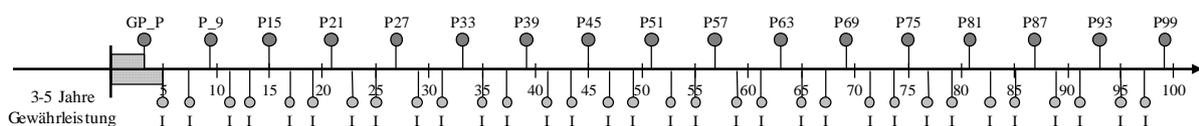


Abbildung 85: Konzept für die mehrdimensionale systematische Zustandserfassung von Hangsicherungen mit bildgebenden Verfahren (Fotogrammetrie, Laserscan) und automatisierter Änderungsdetektion

Standardlebenszyklus Straßenbrücke: Mittlere Instandsetzungsintervalle und Kosten



Zustandserfassung: Bericht mit Checkliste, Bildern und Benotung



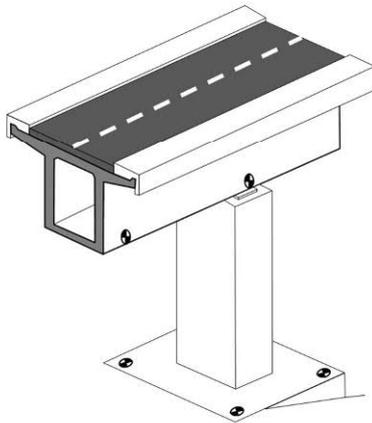
RVS 13.03.11: → Überwachung (alle 4 Monate), Kontrolle alle 2 Jahre, Prüfung alle 6 Jahre, Sonderprüfung im Anlassfall
 → Tragfähigkeit & Gebrauchstauglichkeit, Benützbarkeit & Sicherheit, Dauerhaftigkeit
 → Maßnahmenempfehlung sofort, kurzfristig < 3 Jahre, mittelfristig < 6 Jahre, langfristig < 10 Jahre

Quelle: HOFFMANN, M. (2018)

Abbildung 86: Schematische Darstellung eines typischen Lebenszyklus von Brückenanlagen im hochrangigen Straßennetz zusammen mit den erforderlichen Inspektions- und Prüfintervalen

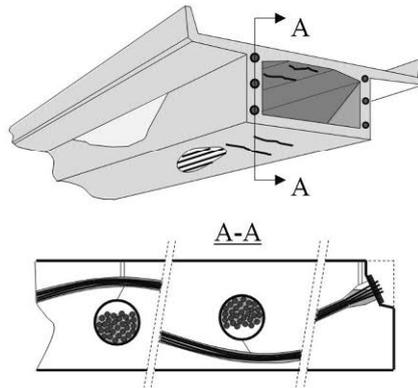
Konzept einer mehrdimensionalen Zustandserfassung von Brückenanlagen mit systematischer Erfassung von Bauwerksgeometrie, Zustand und Deformationen mit Integration in Kontrolle & Prüfung

a) Plan VS Bestandsgeometrie:



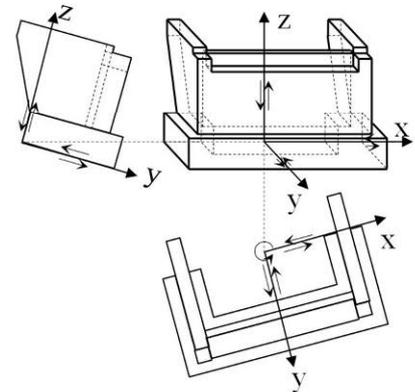
- Digitale Bau- und Bestandspläne (2D)
- Objekt (Drahtgitter/Volumensmodell 3D extrahiert)
- Lage fixierter Messpunkte
- Bauteile bzw. Elemente
- Materialparameter (Bau/Abnahme)
- BMS – Daten: Alter, Baujahr, Maßnahmen auf Objekt & Elementebene, Dimensionierung

b) Zustandsdaten aus Erfassung



- Schadenserkennung zu Elementen
- Schadenskatalog mit Schäden
- Typische Parameter Messung:
 - Karbonatisierungstiefe [mm]
 - Chlorideindringungen [mm, %]
 - Risse mit Breite [mm], Länge [m]
 - Abplatzungen Tiefe [mm], Fläche [m²]
 - Korrosion (Rostfahnen, Rest QS cm²)
 - Feucht-/Hohlstellen, Ausblühung [m²]
- Umweltdaten: CO, CO₂, Temperatur
- Materialparameter (Beton, Stahl)

c) Deformation unter Last



- Durchbiegung [mm] nach Lastgröße [kN] und Zeit [a]
- Rotation, Schrägstellung Elemente [°]
- Spannungsbilder und Tensoren
- Rissöffnung unter Last [mm]
- Starrkörperbewegung x,y,z [mm]
- Setzungen Bauwerk [mm]
- Schrägstellung Bauwerk [°]
- Beulung Stegbleche etc.

d) Erfassung und Zuordnung von Schadensmerkmalen an (virtuellen) Brücken

Quelle: HOFFMANN, M. (2018)

Brückenelemente	
1. Unterbau Wiederlager, Flügelmauer, Pfeiler, Anker, Gerinne	
2. Überbau Tragwerk, Fahrbahnplatte, Kragplatte, Steg, Platte, Spannglied, Seil, Kabel	
3. Lager Art, Lagersockel	
4. FÜK FÜK Wiederlager, FÜK Pfeiler	
5. Abdichtung & Entw. TW-Abdichtung, Einläufe, Abdichtungsentwässerung, Ablaufrohre	
6. Randbalken Randbalken, Schranmbord, Fugen	
7. Ausrüstung Geländer, Leitschienen, LSW, Spritzschutz, Wartungsstege, Beleuchtung, Schilder	

Schadensmerkmale Überbau	Werte
1. Nester, Fehlstellen, Betonabplatzungen	
2. Ausblühungen, Nassstellen und Sinterfahnen Oberfläche	
3. Risse im Beton (allgemein)	> 1 mm
4. Biegerisse im Feldmitte/ unzulässige Durchbiegung	0,2 – 1 mm
5. Diagonale Schubriss (Stützen)	< 0,2 mm
6. Nicht ausreich. Betondeckung	
7. Korrosion Bewehrung	
8. Bruch der Stahlbetonplatte	
9. Korrosion Spannbewehrung (Spannbetonbrücken)	
10. Unvollständige Verpressung Spannglieder	
11. Korrosion Schäden Spanverankerung	
12. Längsriss in Bogenachse	
13. Risse / Abplatzungen Kämpfer	
14. Örtliches Beulen (Verbundbr.)	
15. Schäden an Querträger, Querrippen, Steher, etc.	
16. Schäden Gerbergelenk:	
17. Besondere Ereignisse (z.B. Faluzuganprall)	

Kontrolle:	Prüfung:	Messtechnisch:
Checkliste (nur vorhandene Schäden)	Aufnahme von Schäden	Aufnehmen, Bereinigen, Messen, Aufbereiten
Fotos wichtiger Schäden	Abschätzen Ausmaß & Schwere sowie Folgen	Orthofotos, Laserscan, Fotogrammetrie, Fotos
Zuordnung Fotos ev. mit kurzer Erläuterung	Fotodokumentation	ERFASSEN, MESSEN, AUFBEREITEN, BMS-EINTRAG
VERÄNDERUNG	ERFASSEN SCHÄTZEN, DOKU	

INFO-TAGS mit Bildern!

Risse linear 3 lfm >1 mm
10 lfm 0,2-1 mm
7 lfm <0,2 mm

Korrosion 4 m² & Ausbrüche 2,5 cm bis Bewehrung

Metadaten: Brücke/Element/Datum/ Erfasser/Schäden Kurzbeschreibung (optional)

03/2018

03/2018

03/2018

Liste Schadensmerkmale nach Häufigkeit, am Objekt nur Liste vorhandener Schäden

*Konzeption einer möglichen Erfassungssystematik für Brückenanlagen im Rahmen des FFG – Forschungsprojektes RISKMON (für ÖBB, ASFINAG, BMVIT mit STRAUSS, A.)

Abbildung 87: Mehrdimensionale systematische Zustandserfassung von Brücken mit Bauwerksgeometrie, Zustand und Deformation mit Überwachung, Kontrolle & Prüfung

5.2 Auswahl Einsatzgebiet

5.2.1 Ziel der Auswahl

In mehreren Brainstorming-Workshops wurde das Potenzial der mobilen Sensorik in unterschiedlichen Abteilungen der Auftraggeber (AG) geprüft. In weiterer Folge sollten Teststellungen definiert werden, die das vermutete Potenzial auf Praxistauglichkeit untersuchen sollen. Eines der Hauptaugenmerke war neben der Unterstützung der Mitarbeiter der AG, die Erhaltung des Forschungscharakters, wodurch viele Standardanwendungen unberücksichtigt bleiben mussten. Der gesuchte Optimalfall waren jene Bauwerke, die eine entsprechende Breitenwirkung aufweisen, wodurch auch Rückschlüsse auf andere Anwendungen ermöglicht werden sollen. Weiters sollen diese gut erreichbar sein, überprüfbare Ergebnisse liefern, die Forschungsvereinbarung erfüllen und grundsätzlich die Möglichkeit einer praktischen Umsetzung (z.B. Zugänglichkeit, Rechtslage etc.) bieten. Die im Projekt behandelten Bauwerke wurden in folgende Bauwerkskategorien eingeteilt:

- Brücken: Beton-, Stahl-, Stahlbeton- und Steinbrücken
- Gebäude: Häuser, Fotovoltaikanlagen, Dächer, Bahnsteighallen, Personenstege
- Schutzverbauungen: Lawenverbauungen, Steinschlagnetze

5.2.2 Brainstorming-Workshops

Um das Potenzial und den Bedarf der mobilen Sensorik gemeinsam mit den Fachexperten der Auftraggeber zu eruieren, wurden Workshops zur Bauwerksinspektion gemeinsam mit Experten von ÖBB und ASFINAG am 20.11.2017, 20.04.2018 und 20.05.2018 durchgeführt. Im Rahmen der Termine wurden neben den Ansprechpartnern (Tabelle 50) für die jeweiligen Bauwerkskategorien die Anwendungen und die Objektauswahl für die Erfassung konkretisiert. Weiters wurde vereinbart, dass die Ansprechpartner die interne Kommunikation mit den entsprechenden Experten bzw. Fachabteilungen übernehmen.

Tabelle 50: Ansprechpartner im Bereich Bauwerksinspektion

Bauwerkskategorie	ASFINAG	ÖBB
Brücken	Thomas Steinbrucker, Michael Zehner	Ulrike Staindl, Norbert Friedl
Gebäude	Thomas Steinbrucker, Michael Zehner	Claudia Wondrak
Schutzverbauungen	Thomas Steinbrucker, Michael Zehner	Christine Schönberger, Michael Brauner

Die im Rahmen dieser Workshops gesammelten Anmerkungen, Ideen und Anforderungen sind nachstehend kurz zusammengefasst:

- Die Erfassung mit Hochleistungsdrohnen und Sensorik soll die Datengrundlage und Sicherheit sowie Nachvollziehbarkeit für Ingenieure verbessern
- Die Prüfindgenieure sollen jedoch weiterhin die Bewertung und Entscheidung treffen
- Bedarf besteht vor allem bei Brücken und momentan nicht erfassbaren Örtlichkeiten

- Vorteile sind die Wiederholbarkeit (Detektion von Veränderungen), Verfügbarkeit (verglichen zu Hubschraubern), flächenhafte Erfassung (viele Methoden momentan reine Stichproben)
- Vergleich mit momentanen Methoden (z.B. bemannte Erfassung, Brückenprüfgerät)
- Möglichkeiten des automatischen Kontrollflugs bei Alarm durch aktuelle Sensorik
- Automatische Änderungsdetektion um den Fokus der Fachmitarbeiter zu steuern
- Automatische Interpretation von Bildern, Sensoren und 3D-Modellen
- Informationen/Daten bei Naturstein und Ziegeln, sowie das Auffinden von Feuchtstellen
- Dachinspektion (Dichtheit, Dachfolien, Veränderung, Stahlkonstruktionen, Schimmel/Algen/Bewuchs), Bahnsteigdächer, Bahnsteighallen (innen), Personenstege, Stahl- und Steinbrücken, Staumauern
- Steinschlagschutznetze, Felslehne, Lawinenverbauung, Verbauungen in Steinschüttgräben; Detektion von Veränderung und deren Auswirkungen (Deformation, Rissen etc.); Witterung als Problem; Flächenhafte Erfassung wegen Vegetation herausfordernd
- Inspektion von Fotovoltaikanlagen, Salzsilos, Hängekonstruktionen
- Testobjekt mit möglichst vielen Eigenschaften bzw. Materialien
- Keine Insellösungen – Ergebnisse in Standardformaten kompatibel mit Bestandssystemen, Datenmengen abschätzen, Integration und Auswertung zeigen

5.2.3 Expertenbefragung

Mit Hilfe der eingebrachten Ideen und Anmerkungen wurde eine Expertenbefragung zu potentiellen drohnengestützten Anwendungen durchgeführt. Ziel war die Strukturierung und Konkretisierung des erfassten Potentials, sowie eine Definition von tatsächlichen Teststellungen. In einem vorbereiteten Excel-Dokument wurden bereits genannte Anwendungen seitens des Projektteams auf Machbarkeit, Forschungscharakter und Überschneidung mit vergangenen Forschungsprojekten bewertet. Grundlage dafür waren neben den Brainstorming-Workshops, die Anwendungserfahrung aus der Praxis, die Projekterkenntnisse aus dem ASFINAG Projekt Ready2Fly (R2F) und die wissenschaftliche Recherche zu Anwendungen und Sensorik. Die Fachexperten der Auftraggeber waren dazu angehalten zusätzliche Anwendungen zu definieren und mögliche Bauwerke zu nennen, die für eine praktische Umsetzung in Frage kommen würden. Anhand der Experteninformation hat das Projektteam einen Vorschlag für das nachfolgende Steuerungsteammeeting erarbeitet.

Beispielhaft für die durchgeführte Expertenbefragung findet sich mit Tabelle 51 ein Ausschnitt des entsprechenden Dokuments. In diesem Fall wurde die Thematik der Stahlbrücken behandelt. Die Fachexperten der AG konnten in der linken Spalte Anwendungen ergänzen oder kommentieren, während auf der rechten Seite entsprechende Objekte vorgeschlagen und die Eigenschaften in Bezug auf die Anwendungen beschrieben werden konnten.

Tabelle 51: Beispiel Expertenbefragung anhand von Stahlbrücken

STAHLBRÜCKEN				VORSCHLAG OBJEKT 1: <i>bitte angeben</i>
Schäden exemplarisch	Eignung für UAS Erhebung ?	Details (Grenzen, Probleme,...)	neue Sensorik/ Erhebungsmethoden	Interessante Merkmale <i>(bitte ankreuzen, evt. Randbedingungen angeben)</i>
Allgemein				
Bauwerksteile aus Beton/Außenflächen	●			
Bauwerksteile aus Stahl/Außenflächen	●			
Bauwerksteile aus Stein/Außenflächen	●			
Hohlkästen Innenflächen	●	größerer Raumbedarf		
Pfeiler/Stützen: Verdrehung/Schiefstellung	●			
Feuchtigkeit/Nässe: z.B. mittels Thermographi	●			
Verschmutzungen/Bewuchs/Graffiti	●			
<i>Zusätzliche Schäden:</i>				
Stahl				
Schraube/Unterlegscheibe/Niet	●			
Schweißnähte/Umschweißungen	●			
Korrosion	●			
Korrosionsschutzbeschichtung: Oberfläche/Ausbesserung/Anhaftung/Kanten-abplatzung	●			
<i>Zusätzliche Schäden:</i>				
Ausstattung				
Rollenlager ohne Schutzeinrichtung, Lagerplatten oben und unten	●			
Lagerstände/Lagerstandsanzeige	●			
Lagerplattenunterstopfung/Fremdkörper	●			
Entwässerungsleitungen	●			
<i>Zusätzliche Schäden:</i>				

Legende

- überwiegend prüfbar
- teilweise prüfbar
- überwiegend nicht prüfbar

In der Auswertung der Expertenbefragung wurden die genannten Objekte mit Punkten von 1 bis 5 bewertet. Die Wertung setzt sich aus der Anzahl der möglichen Anwendungen, die im Rahmen der Erfassung durchführbar wären, der forschungsbezogenen Relevanz und der Prioritäten der Fachexperten der AG zusammen. In Tabelle 52 wird ein Ausschnitt aus dem Ergebnis der Expertenbefragung wiedergegeben.

Tabelle 52: Ausschnitt aus der Auswertung der Expertenbefragung im Teilbereich Bauwerksinspektion

Beschreibung der Anwendung	Machbarkeit	Standardanwendung	R2F Durchführung	G46 Murbücke	Gewölbe Hochbahn Itali- enerschleife	Dorfgastein, Klammstein- tunnel, Steinschlagnetze	ABM Graz Raaba & VMZ Plabutsch / Fotovoltaik	Bahnsteighalle Praterstern 56004284
Eingereicht von				Steinbrucker	Friedl	Brauner	Steinbrucker	Wondrak
Firma				ASF IN AG	ÖBB	ÖBB	ASF IN AG	ÖBB
Bauwerkstyp				Stahlbrücke	Stahlbetonbrücke	Schutzverbauung	Gebäude	Gebäude
Wertung				5	5	5	5	5
Bauwerke aus Beton/Außenflächen	ja	ja	ja		ja			ja
Feuchtigkeit/Nässe	möglicherweise	nein			ja		ja	
Deformation	möglicherweise	nein		ja				ja
Verschmutzungen/Bewuchs	ja	ja		ja	ja		ja	ja
Betonoberfläche: Abplatzungen/Bindedrahtrest/Fremdkörper/mechan. Beschädigungen	ja	ja	ja		ja		ja	ja
Betonoberfläche: Schalungsanker/Grobkornstelle/Anhaftung	ja	ja	ja		ja			
Betonoberfläche: Einstufung in Sichtbetonqualitätsstufe	ja	ja						
Betondeckung	nein	nein						
Karbonatisierung	nein	nein			ja			
Tausalze/Chlorideinwirkung	nein	nein			ja			
Alkali-Kieselsäurereaktion	nein	nein			ja			
Erkennbarkeit Risse, Breite $b \leq 0,2$ mm	nein	nein			ja			
Erkennbarkeit Risse, Breite $b > 0,2$ mm	ja	ja	ja		ja			ja
Abplatzungen/freiliegender Bewehrung	ja	ja	ja		ja		ja	ja
Aussinterung	ja	ja	ja		ja		ja	ja
Instandsetzung/Betonersatzsystem: Haarrisse	möglicherweise	nein			ja			
Hohlstellen, Kiesnester		nein			ja			
Korrosion	ja	ja		ja			ja	ja
Korrosionsschutzbeschichtung: Oberfläche/Ausbesserung/Anhaftung/Kantenabplatzung	ja	ja		ja			ja	ja
Entwässerungsleitungen		nein			ja		ja	ja
Bauwerksteile aus Stahl/Außenflächen	ja	ja		ja				ja
Hohlkästen Innenflächen	nein	nein						
Schraube/Unterlegscheibe/Niet	möglicherweise	nein					ja	ja
Schweißnähte/Umschweißungen	ja	nein		ja			ja	ja
Rollenlager ohne Schutzeinrichtung, Lagerplatten oben und unten	möglicherweise	nein						

Lagerstände/Lagerstandsanzeige	möglicherweise	nein						
Lagerplattenunterstopfung/Fremdkörper	möglicherweise	nein						
Pfeiler/Stützen: Verdrehung/Schiefstellung	ja	nein						ja
Bauwerksteile aus Stein/Außenflächen	ja	ja						
Bauwerksteile aus Holz/Außenflächen	ja	ja						
Fremdkörper	ja	ja						
Erfassung des Volumens der Ablagerungen in der jeweiligen Schutzverbauung (Gestein, Erdreich, etc.)	ja	ja	ja					
Schiefstellung, verbogene Konstruktion	ja	ja						
Brandspuren	ja	ja						
Offensichtliche Schäden, welche die Standfestigkeit gefährden	ja	ja	ja					
Schneelast	ja	ja					ja	ja
Wärmeverlust	ja	ja						
Funktionsfähigkeit von Einbauten	ja	ja						
Vermessung, bspw. von Sicherheitsabständen (Oberleitung zu Objekt)	ja	ja						ja
Erfassung des IST-Bestandes	ja	ja						ja
Dachfolien	ja	ja					ja	ja
Dachdeckung	ja	ja						
Spenglerarbeiten und Einbauten wie Dachrinnen, etc.	ja	ja					ja	ja
Blitzschutz	ja	ja			ja			
Geländer	ja	ja			ja			
LSW	ja	ja			ja			
Randbalken	ja	ja			ja			
RB-Abgang	ja	ja			ja			
Fotovoltaikanlage	ja	nein					ja	
Schaden Bauwerksumgebung						ja		
Funktionaler Schaden Bauwerk						ja		
Schaden Fundament						ja		
Schaden tragender Oberbau						ja		
Schaden nicht tragender Oberbau						ja		
Schaden Sicherheitseinrichtung						ja		

5.2.4 Änderungen, Ergebnisse und Beschluss

Auf Vorschlag des Projektteams wurden im Rahmen des Steuerungsteammeetings jene Anwendungen beschlossen, die aus dem Ergebnis der Expertenbefragung hervorgegangen sind. Im Gegensatz zu der im Angebot vorgesehenen Aufteilung von 2 x Bauwerken und 2 x Schutzbauwerken, wurden statt der Erfassung eines zweiten Schutzbauwerkes eine Gebäudeinspektion (ABM Graz-Raaba) beschlossen. Die Anwendung Praterstern Bahnhofshalle wurde auf Grund des enormen organisatorischen Aufwandes ausgesetzt. Weiters wurden im Steuerungsteam einzelne Teststellungen auf das Frühjahr 2019 verschoben, um Ergebnisse der Labortests abzuwarten sowie weitere Abstimmungen durchführen zu können.

5.3 Einsatzplanung

5.3.1 Schutzverbauungen Klamstein (ÖBB)

Anhand der Informationen der Expertenbefragung und in Abstimmung mit den Fachexperten bzw. Ansprechpartnern (Michael Brauner und Christine Schönberger) wurde ein Anforderungsprofil erstellt. Danach wurde eine entsprechende Vorauswahl der Sensorik und Flugmethodik durchgeführt. Folgende Anforderungen an die Erfassung wurden kommuniziert:

- Bestandsobjekte und Bauwerks Umgebung
- Schäden in der Bauwerks Umgebung
- Funktionale Schäden am Bauwerk
- Schäden am Fundament
- Schäden am Überbau und Sicherungskonstruktionen
- Schäden an Netzen und Ankern
- Geröll und Absturzmaterial in Netzen und Sicherungen

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich oberhalb des Südportals des unteren Klammtunnels (bis zu 3 Schutzanlagen erfassbar), sowie des Nordportals des oberen Klammtunnels (bis zu 5 Schutzanlagen erfassbar). Eine Übersicht über das Interessensgebiet, ist in Abbildung 88 ersichtlich. Im Vorfeld des Einsatzes wurde auf die Eigentumsverhältnisse vor Ort und den damit entstehenden genehmigungstechnischen Vorgaben Rücksicht genommen. Eine Übersicht der Eigentumsverhältnisse findet sich in Abbildung 89. Aufgrund der Anforderungen, die eine visuelle Begutachtung in Kombination mit der geometrischen Form des Objektes voraussetzen, wurde eine fotogrammetrische Erfassung für den Einsatz gewählt. Durch die starke Hangneigung vor Ort wurde für die Flugplanung auf ein Höhenmodell des Landes Salzburg zurückgegriffen. Durch die Anwesenheit von Personen, die nicht direkt am Flugablauf teilnahmen, war zudem besonders auf deren Sicherheit zu achten.

Abbildung 88: Übersicht Interessensgebiet Klamstein





Abbildung 89: Eigentumsverhältnisse im Interessensgebiet (Auszug WebGIS der ÖBB vom 14.8.2018)

Tabelle 53: Legende der Eigentumsverhältnisse

Bezeichnung	Eigentum
Rot markierte Bereiche	ÖBB Infrastruktur AG
1251/2; 654	Österr. Bundesforste, Pummerge. 10 - 12 in 3002 Purkersdorf
336/3	Herrman Esterbauer, Klamm 28 in 5621 St. Veit im Pongau

Auf Wunsch des Auftraggebers ÖBB wurden die Schutzverbauungen nach einigen Wochen ein zweites Mal befliegen und deren Zustand neuerlich erfasst. Ziel dabei war das Feststellen von Veränderungen sowie die Detektion manipulierter Auffälligkeiten, welche persönlich durch Herrn Dr. Michael Brauner, ÖBB Naturgefahren, ohne Kenntnis des Projektteams eingebaut wurden.

Für die Zweiterfassung wurde bewusst ein weniger leistungsstarkes Fluggerät eingesetzt, um auf zusätzliche Erkenntnisse für den Konnex zwischen dem optimalen Gerätesetting und aussagekräftigen Ergebnissen rückschließen zu können. Die Herausforderung in dem ausgewählten Talkessel lag insbesondere auch an den Rahmenbedingungen. Neben mangelndem GPS-Empfang sind insbesondere Windverwirbelungen und laufende Änderungen der Windrichtung für die Flugplanung zu berücksichtigen gewesen.

5.3.2 Gebäudeinspektion ABM Graz-Raaba (ASFINAG)

Wie auch bei der Inspektion der Schutzanlagen in Klammstein, wurden vorerst Anforderungen definiert, die aus der Kommunikation mit dem Ansprechpartner (Thomas Steinbrucker, ASFINAG) und dem Ergebnis der Expertenbefragung abgeleitet wurden. Folgende Anforderungen waren in der Praxis zu prüfen:

- Dachflächenzustand
- Feuchtigkeit
- Dokumentation/Vermessung
- Fotovoltaik Zustandsprüfung
- Schäden

Das Interessensgebiet entspricht dem Gelände der Autobahnmeisterei Graz-Raaba, wodurch die Eigentumsverhältnisse keine zusätzlichen Schritte erforderten. Um den Betrieb nicht durch Sicherheitseinschränkungen zu beeinträchtigen, wurden zwei Gebäude im nördlichen Bereich des Geländes gewählt, die beide über eine größere Fläche an Fotovoltaikanlagen verfügen. Zusätzlich wurden zwei Salzsilos für eine Inspektion gewählt.

Zur Erfassung des Dachflächenzustands, sowie der Fotovoltaikanlagen, muss die visuelle Inspektion der aufgenommenen Daten ermöglicht werden. Aus diesem Grund wurde der Einsatz unterschiedlicher fotogrammetrischer Sensorik zur Erfassung der Gebäude gewählt. Sollten die Ergebnisse der Labortests einen Einsatz von zusätzlicher Sensorik nahelegen, wird ein zusätzlicher Flugtag eingeplant. Durch die Nähe zur Autobahn wurde eine Sondergenehmigung der Austro Control für den Flugtag eingeholt, eine Abstimmung mit dem Tower FH Graz erfolgte ebenso. Der laufende Betrieb und eine aktive Baustelle am Gelände, mussten in der Vorbereitung und Durchführung berücksichtigt werden.

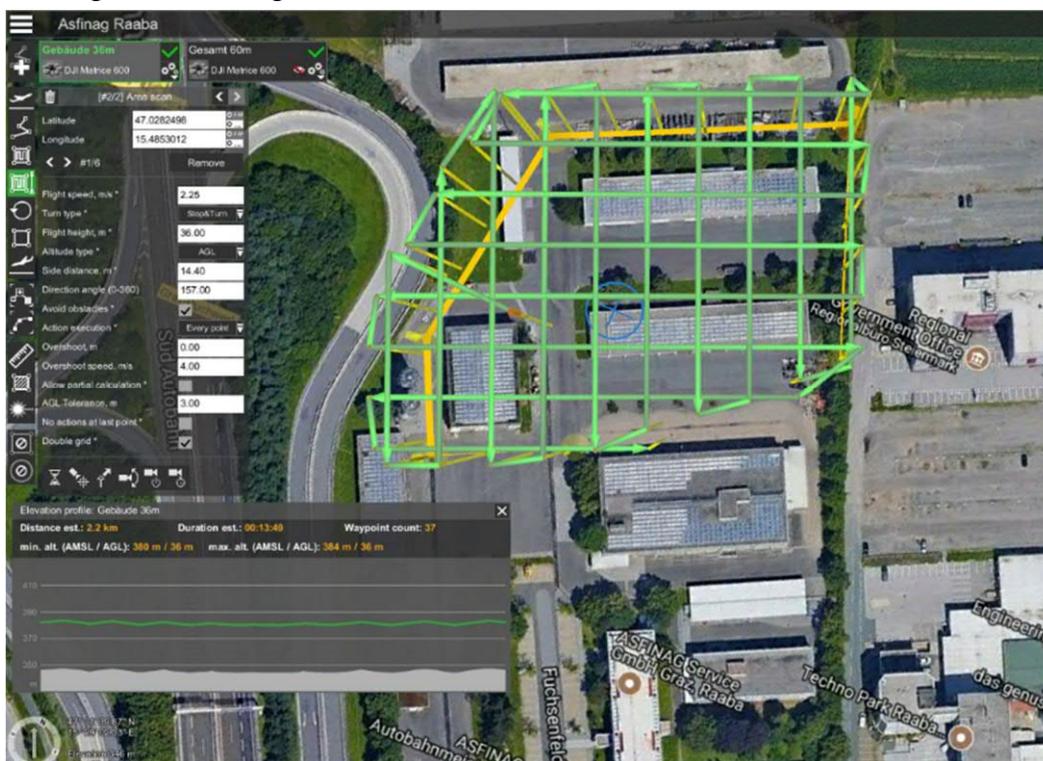


Abbildung 90: Flugplanung Orthofoto Graz-Raaba

5.3.3 Italienschleife (ÖBB)

Vorgabe für die Inspektion der Bogenbrücke war eine Rissdetektion anhand von vertikalen Orthofotos mit ausreichend hoher Auflösung an der zu inspizierenden Oberfläche. Zusätzlich wurden mit einer Thermalkamera radiometrische Bilder aufgezeichnet.

Das Fluggebiet befand sich innerhalb vom Luftbeschränkungsgebiet Wien LOR15, weshalb eine Einzelgenehmigung von Austro Control eingeholt wurde. Aufgrund des Einsatzes neben Schienenanlagen wurden folgende Sicherheitsparameter berücksichtigt:

- Flughöhe für Inspektion stets niedriger als Oberkante Brücke
- Nur kurze Aufenthalte schräg über/neben Gleiskörpern bei Schräg-/Überflug für Orthofoto
- Abstand halten zu in Betrieb befindlichen Schienenfahrzeugen

Für die Flugplanung wurden folgende Parameter vorgesehen:

- Flugparameter:
 - Für die Zustandserfassung:
 - § Vertikales Raster
 - § Abstand: 4m
 - § Überlappung: 85% / 70%
 - § Fluggeschwindigkeit: 1m/s
 - Für das Orthofoto:
 - § Angepasstes Raster
 - § Flughöhe: 60m AGL
 - § Überlappung: 88% / 55%
 - § Fluggeschwindigkeit: 3,5m/s
- Flugsteuerung:
 - Inspektion: Wegpunktflug und für Test der Einstellungen manuelle Steuerung
 - Orthofoto: Wegpunktflug

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten wurde für die Inspektionsflüge ein vertikales Raster für den Wegpunktflug gewählt.

Die Datenerfassung erfolgte am 09.04.2019 mit einer Dauer von rund 3 Stunden, sowie am 02.05.2019 mit einer Einsatzdauer von knapp einer Stunde bei jeweils trockenen und sonnigen Witterungsverhältnissen.

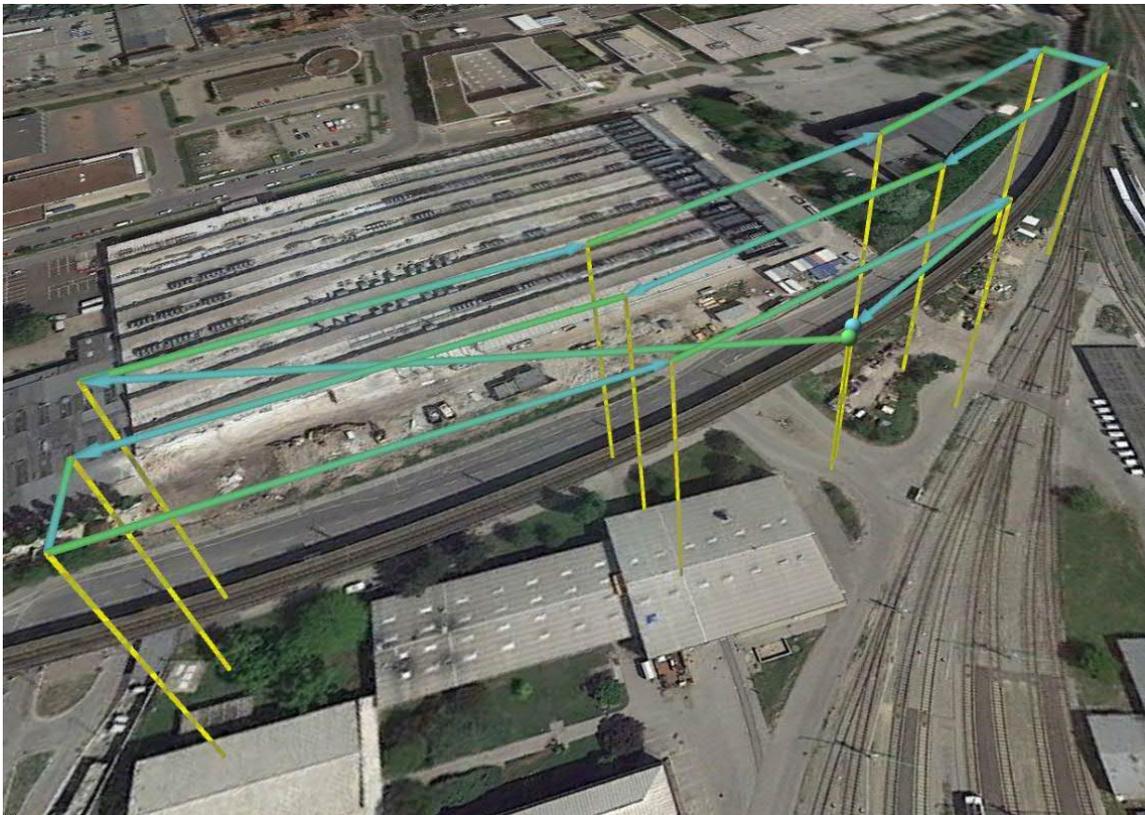


Abbildung 91: Flugplanung Orthofoto

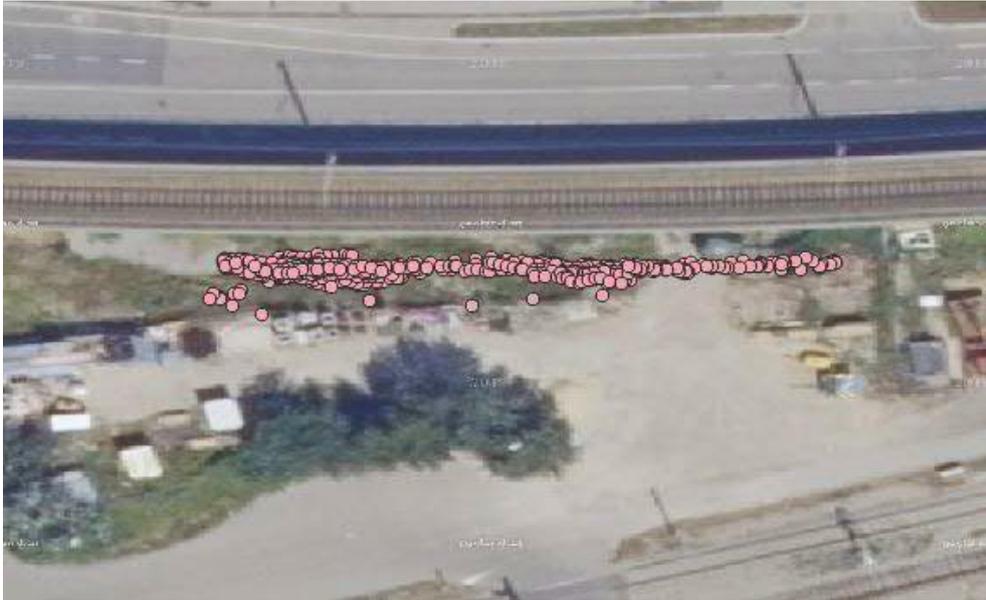


Abbildung 92: Bildkoordinaten Inspektionsflug

5.3.4 Murbrücke (ASFINAG)

Vorgabe für die Inspektion der Murbrücke war eine Detektion von Auffälligkeiten mit ausreichend hoher Auflösung an der zu inspizierenden Oberfläche. Zusätzlich waren mit einer Thermalkamera radiometrische Bilder zu erfassen.

Das Fluggebiet befand sich innerhalb der Kontrollzone vom Flughafen Graz und waren die Einsätze dementsprechend mit der Luftverkehrskontrolle abzustimmen. Aufgrund der unmittelbaren Nähe zur Autobahn wurde eine Flughöhe gewählt, die stets niedriger als die Fahrbahnoberkante war, um eine Ablenkung von Autofahrern zu vermeiden

Für die Flugplanung wurden folgende Parameter berücksichtigt:

- Flugparameter für die Zustandserfassung:
 - § Vertikales Raster
 - § Abstand: 4m
 - § Überlappung: 75% / 65%
 - § Flugeschwindigkeit: 1,5m/s
- Flugsteuerung:

Aufgrund der geringen Distanz zur Wasseroberfläche und zur Brücke, wurde von einem Wegpunktflug mangels absoluter Positionsgenauigkeit Abstand genommen. Die Anwendung wurde somit unter Berücksichtigung der Planungsparameter manuell geflogen.

Die Datenerfassung erfolgte am 17.04.2019 mit einer Dauer von 3 Stunden bei trockenen und sonnigen Witterungsverhältnissen.

Aufgrund der geringen Höhe zwischen Wasseroberfläche und Brückenkonstruktion, wurde auf die geplanten Datenaufnahmen vom Unterbau der Brücke verzichtet.



Abbildung 93: Inspektionsflüge Bildkoordinaten Murbrücke



Abbildung 94: Aufnahmen vom Einsatz bei der Murbrücke

5.4 Datenauswertung UAS

5.4.1 Schutzverbauungen Klammstein (ÖBB)

Die 79 km lange Tauernbahn überwindet die Hohen Tauern und beinhaltet eine Reihe von Brücken und Tunnelbauwerken einschließlich des Tauerntunnels (8.371) und wurde im Jahr 1905 in Betrieb genommen. Der Abschnitt Klammstein liegt am nördlichen Ende der Tauernbahn zwischen Schwarzach-St. Veit (Salzburg) und Spittal-Millstättersee (Kärnten). Die letzte größere Investition mit rund 15 Mio. € in die Ertüchtigung der Strecke im nördlichen Abschnitt wurde im Jahr 2013 abgeschlossen. Der Streckenabschnitt führt jeweils durch einen Tunnel nördlich und südlich der Klamm sowie eine mit Naturstein verkleidete Bogenbrücke dazwischen. Die Tunnelportale und die Brücke sind auf der Nord- und Südseite durch umfangreiche Schutzverbauungen vor abstürzendem Gestein sowie Lawinen gesichert. Das Gelände im Abschnitt ist aufgrund der steil abfallenden Felshänge nur zu Fuß erreichbar. Die klassische Inspektion der Schutzverbauungen wie z.B. in Klammstein erfolgt daher periodisch mit entsprechender Kletterausrüstung durch geschultes Personal der ÖBB – Infrastruktur (Abbildung 95).

Wie in der Einsatzplanung beschrieben wurden die Schutzverbauungen im Rahmen von RISKMON zweimal erfasst, wobei die Ersterfassung auf die Detektion von Schäden und die Zweiterfassung mit einem vereinfachten Gerätesetting zusätzlich auf Veränderungen abzielte. Abbildung 96 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der Klammsteinbrücke mit Flugplan, 3D - Modellüberblick und Detailausschnitt basierend auf einer fotogrammetrischen Rekonstruktion. Das Hauptaugenmerk der Erfassungen lag jedoch auf der Erprobung eines Einsatzes von UAS in der Erfassung der nördlichen und südlichen Felshänge sowie der Schutzverbauungen. Dementsprechend zeigt Abbildung 97 den Flugpfad sowie die fotogrammetrische Rekonstruktion des Nordhangs mit niedriger bzw. hoher Detailtiefe. Der wesentliche Unterschied liegt in der Rechenzeit bzw. der Detailschärfe sowie Dateigröße von resultierender Punktwolke, 3D – Mesh sowie texturiertem 3D – Modell. Während für die Analyse der Vollständigkeit der Aufnahme bereits eine niedrige Detailstufe ausreicht, empfiehlt sich für die Zustandserfassung die höchste Detailstufe.



Abbildung 95: Schutzverbauung Klammstein – Projektgebiet und Ausschnitt Brücke



Abbildung 96: Schutzverbauung Klammstein – 3D - Modellüberblick und Ausschnitt Brücke

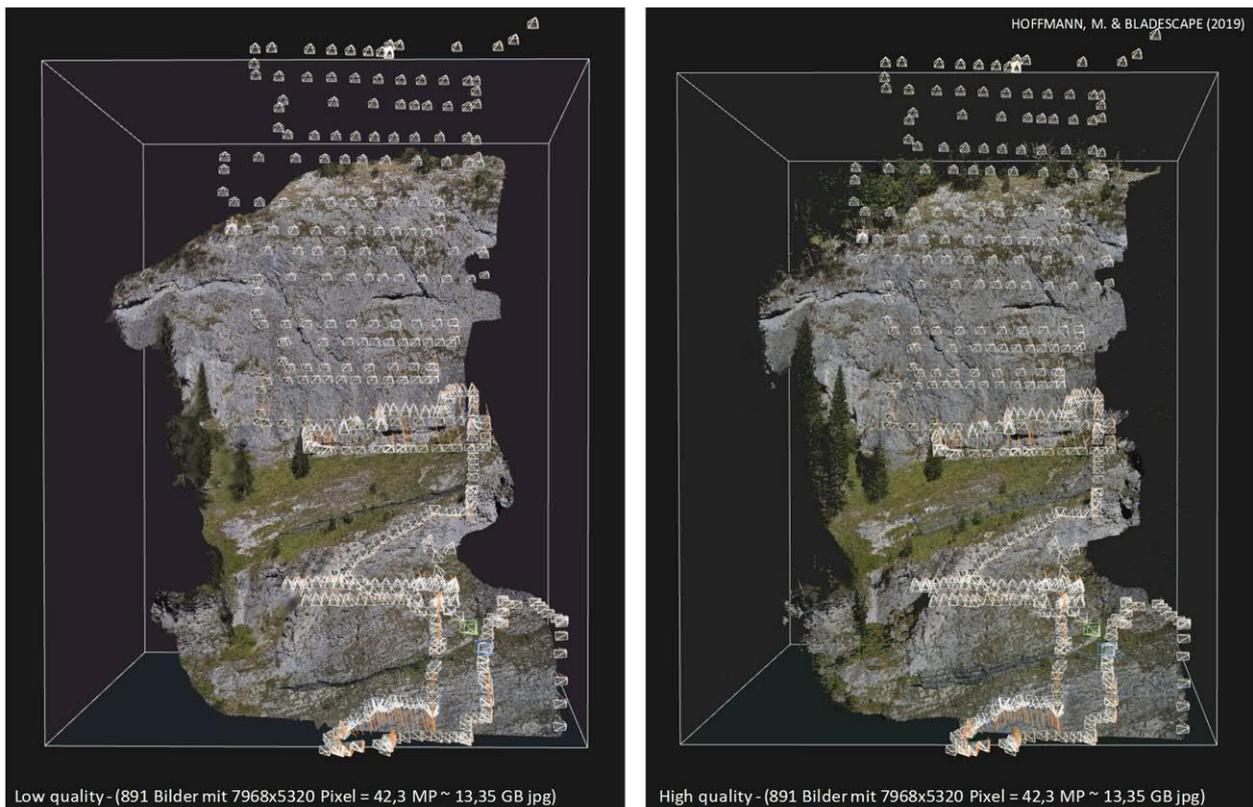


Abbildung 97: Schutzverbauung Klammstein – 3D – Modell Nordhang mit Flugpfad (low, high)

Wie die Ergebnisse der Rekonstruktion der Schutzverbauung (Schneebrücke) mit hoher Detailstufe in Abbildung 98 zeigen, stellt die 3D-Rekonstruktion komplexer Strukturen und insbesondere Vegetation mittels Fotogrammetrie trotz der hohen Auflösung der Bilder eine Herausforderung dar. In solchen Fällen würde eine aufwändige Kombination mit Laserscans ein besseres Ergebnis liefern. Dementsprechend sind volumetrische Änderungen (z.B. Felsausbrüche) in Punktwolke und 3D – Modell detektierbar, für die kleinteilige Schadensbeurteilung ist eine Einzelanalyse der Bilder sowie Referenzierung der Ergebnisse im 3D – Modell meist zielführender.



High quality - (125 Bilder mit 7968x5320 Pixel = 42,3 MP ~ 1,86 GB jpg)



Sony ILCE-7RM2 (42 MP) – Ankerung Fangnetz



Sony ILCE-7RM2 (42 MP) – Ankerung Detail

Abbildung 98: Schutzverbauung Klammstein – 3D – Modell Schneebrücke und Aufnahmen (high)

Aufbauend auf diese Erkenntnisse wurden Auffälligkeiten aus der ersten Analyse einer Detailbegutachtung an den Einzelbildern unterzogen, um die Möglichkeit einer Detektion von vorhandenen Schäden sowie angebrachte Veränderungen eingehender zu begutachten. Dementsprechend sind die in Abbildung 99 (geknickte Streben alte Verbauung) sowie Abbildung 100 (Dehnschraube gestreckt, Korrosion Befestigung) gezeigten Schäden stellvertretend für eine Vielzahl an detektierten Auffälligkeiten dargestellt. Im Gegensatz zu weitgehend automatisiert detektierbaren geometrischen Änderungen sind derzeit Algorithmen für eine sinnvolle Detektion der sehr unterschiedlichen Auffälligkeiten nur als Unterstützung einsetzbar.



Abbildung 99: Schutzverbauung Klammstein – Beispiel Schäden Verbauung (alt)

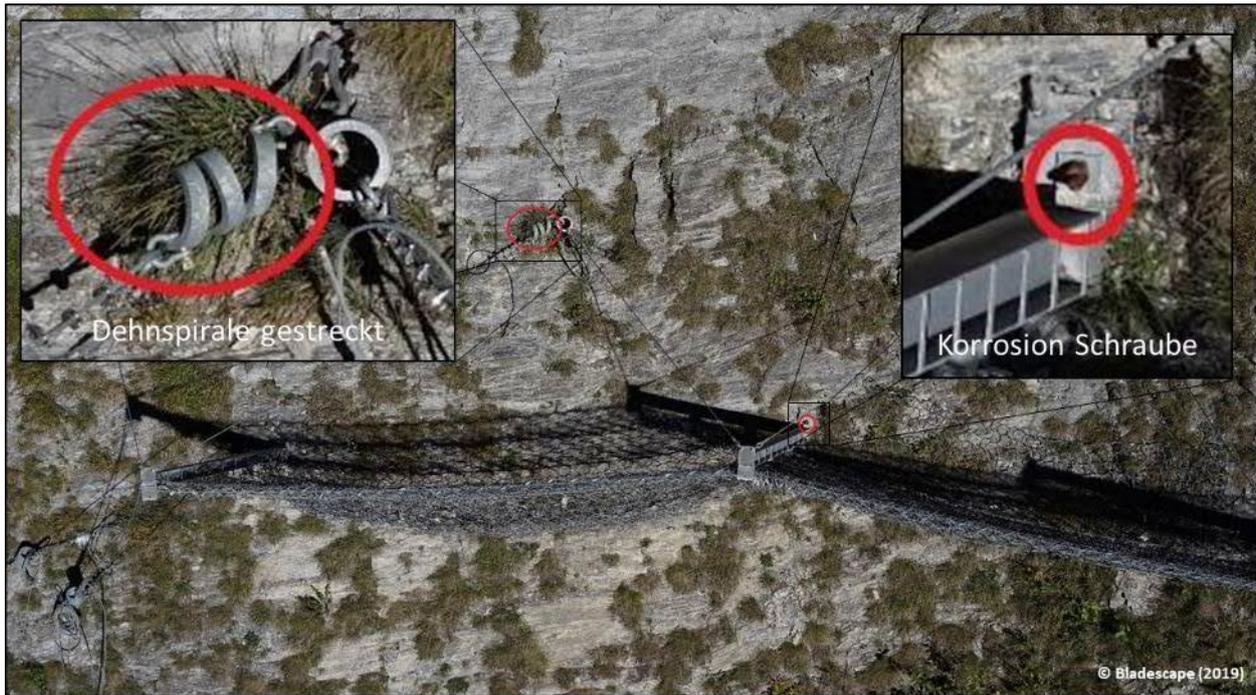


Abbildung 100: Schutzverbauung Klammstein – Beispiel Schäden Verbauung (Dehnspirale, Korrosion)

Aufbauen auf die Forschungsergebnisse von RISKMON wird daher ein hybrider Ansatz mit genauer Ersterfassung und darauf aufbauend eine Vollerfassung und Analyse der Schutzbauwerke alle 3 bis 6 Jahre bzw. nach Ereignissen empfohlen. Für Kontrollen und Inspektionen wird dagegen ein vereinfachter Ansatz mit Prüfung und Aufklärung an relevanten Stellen zielführender sein. Abgesehen von automatisiert detektierbaren größeren geometrischen Abweichungen wird es weiters sinnvoll sein, die Bilddaten für spätere Analysen auf dem 3D – Modell automatisiert zu verorten. Gerade bei der großen Zahl an erfassten Bildern würde dies einen schnellen Vergleich und Analyse kritischer Bereiche aus unterschiedlichen Erfassungen erlauben (Abbildung 101).

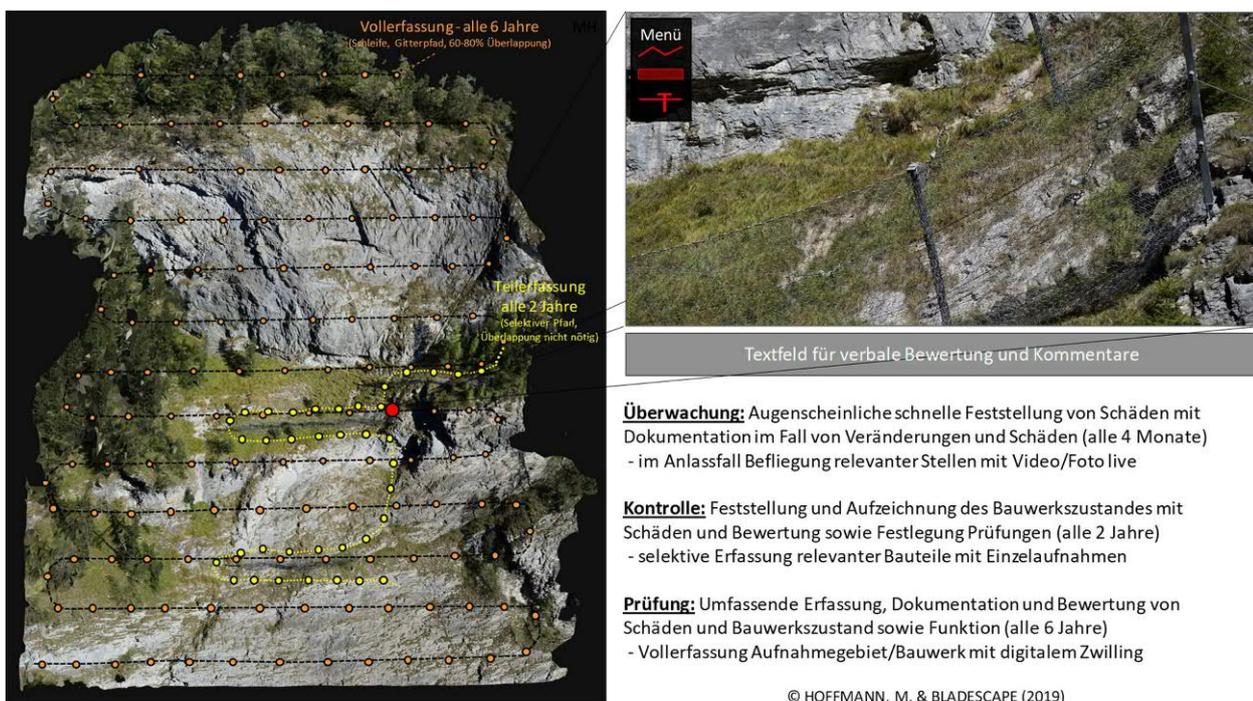


Abbildung 101: Schutzverbauung – Empfehlungen für Kontrolle, Inspektion, Prüfung (generell)

5.4.2 Gebäudeinspektion ABM Graz-Raaba (ASFINAG)

Die Autobahnmeisterei Graz-Raaba (Fuchsenfeldweg 77, 8074 Graz) ist im Südosten von Graz an der A2 situiert und betreut von hier aus den Abschnitten der A2 – Südautobahn Ast Gleisdorf West bis Ast Mooskirchen sowie Teile der A9 Pyhrn Autobahn mit dem Plabutschtunnel. Die Autobahnmeisterei ist oberhalb des Knotens Graz-Ost direkt an der Auffahrt Graz-Puchwerk situiert bzw. hinter dem Bürogebäude der ASFINAG – Service GmbH situiert. Das Materiallager bzw. die überdachten Lagerplätze sind auf der Hinterseite im Norden der Liegenschaft situiert. Wie das Luftbild weiters zeigt, ist die Betriebsfläche asphaltiert und sowohl das Hauptgebäude, als auch die Dächer der Garagen sind großflächig mit Solarpanelen bestückt. Auf der Westseite befinden sich zwei kleinere Salzsilos älterer Bauart sowie zwei große neue Salzsilos in Holzbauweise mit Solelagertanks und Solemischanlage dazwischen für den Winterdienst (Abbildung 102).

Die Zielsetzung der Bauwerkserfassung der ABM Graz-Raaba war die Anwendung der Drohneninspektion in der Abbildung des Betriebsgeländes mit Einsatz der Sensorik, Erstellung von 3D – Modellen und Orthofotos für die Bestandsdokumentation sowie Schadensanalyse. Neben der großflächigen Erfassung sind die Aufnahmen insbesondere eine Grundlage für die Inspektion der Salzsilos, der Dächer einschließlich der Solarpaneele sowie der Integration in die Bestandsdokumentation. Dementsprechend zeigt Abbildung 103 ein Orthofoto des Betriebsgeländes mit hochauflösenden Detailausschnitten der Solarpaneele für die weitere Analyse. Während für die Identifikation von augenscheinlich erkennbaren Defekten fotogrammetrische Aufnahmen ausreichen, sind Defekte in Solarpaneelen insbesondere aus thermographischen Aufnahmen extrahierbar. Für diese Analyse existieren bereits geeignete Algorithmen (Abbildung 104), eine sinnvolle Anwendung erfordert jedoch eine Implementierung sowie parallele Funktionsanalyse der einzelnen Paneele für die Ergebnisvalidierung, die den Rahmen von RISKMON sprengen würden. Eine praktische Umsetzung samt Implementierung auf Basis der Analysen im Forschungsprojekt erscheint aber kurz- bis mittelfristig machbar.

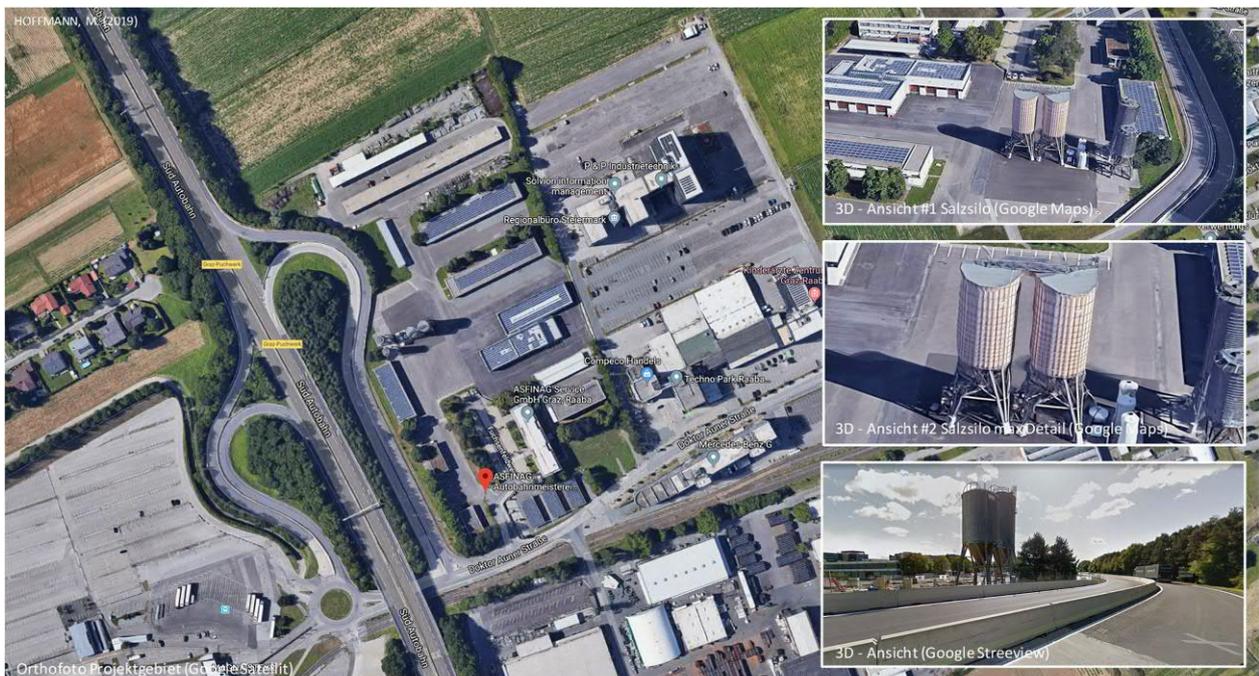


Abbildung 102: ABM Graz Raaba– Übersicht sowie 3D – Ansicht (Google Maps)



Abbildung 103: ABM Graz Raaba– Orthofoto Untersuchungsgebiet (high)

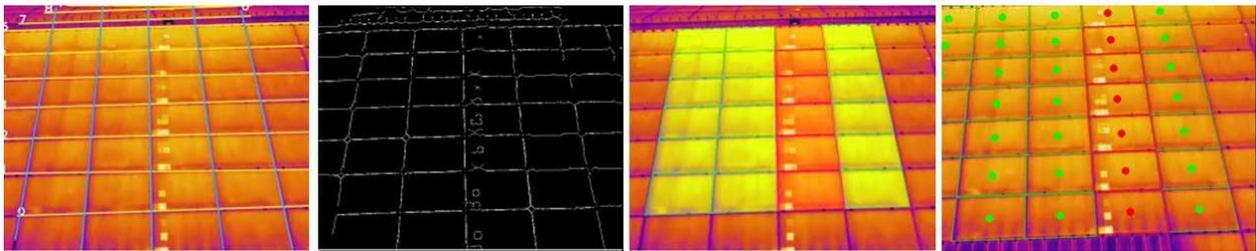


Abbildung 104: Funktionsanalyse von Solarpanelen mit Thermografie/Python (github.com/cdeldon)

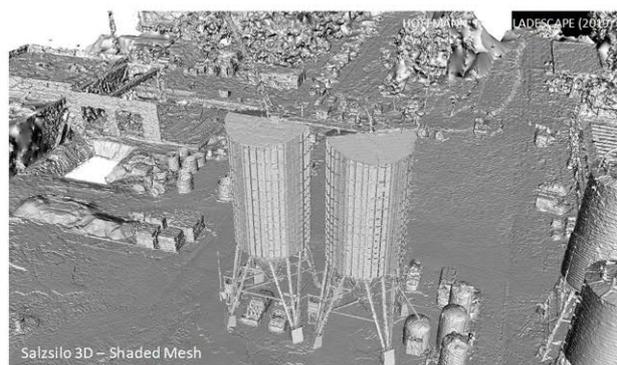


Abbildung 105: ABM Graz Raaba– Salzsilo Übersicht (high)

Ein wesentlicher Aspekt von RISKMON war die Möglichkeit einer Extraktion von 3D – Modellen für die Erstellung digitaler Zwillinge bzw. der virtuellen Inspektion am Schreibtisch. Zur Auslotung der Möglichkeiten wurden daher detaillierte fotogrammetrische Aufnahmen insbesondere der neuen Salzsilos erstellt und aus diesen eine Punktwolke, ein 3D – Mesh sowie ein texturiertes 3D – Mesh berechnet (Abbildung 105). Wie das in Abbildung 106 dargestellte Modell zeigt, sind insbesondere hochauflösende texturierte 3D – Meshes geeignet. Wie der Vergleich von einem Detailausschnitt des Modells zeigt, lassen sich bei komplexen Oberflächen aus Einzelbildern mehr Informationen extrahieren, da es zu Verwaschungen kommt (Abbildung 107).

HOFFMANN, M. & BLADESCAPE (2019)



Abbildung 106: Salzsilo 3D - Modell (high)



Salzsilo 3D – Details Textured Mesh (High quality processing) – verwaschene Textur und Trägerstruktur mit toten Sichtwinkeln aus der fotogrammetrischen Rekonstruktion



Salzsilo Originalfoto (Drohne) Details – Schrift gut erkennbar und prozessierbar, wobei nur genau der Bildausschnitt mit den enthaltenen Details und Sichtwinkel enthalten sind

Abbildung 107: ABM Graz Raaba– Salzsilo Detailvergleich 3D – Modell und Foto (high)

5.4.3 Italienschleife (ÖBB)

Die Italienschleife ist eine einspurige elektrifizierte Verbindungsstrecke als Hochbahn im Wiener Bezirk Floridsdorf zwischen der Nordwestbahn in Jedlersdorf und der Nordbahn in Leopoldau bei Wien. Der betreffende Teil der Italienschleife wurde als Gewölbebogen in Beton ausgeführt und am 1. Dezember 1916 in Betrieb genommen. In den Jahren 1944 und 1945 kam es infolge des 2. Weltkriegs zu Beschädigungen, die ab 1949 saniert wurden. Zwischen 1996 und 1998 erfolgte eine umfassende Sanierung und Ertüchtigung, die mit der Eröffnung und Inbetriebnahme im Mai 1999 abgeschlossen wurde.

Im Zuge des Forschungsprojektes RISKMON erfolgte eine (Teil-)Erfassung der Italienschleife (ÖBB Bogenbrücken-Serie). Hauptzielsetzung war die Prüfung ob bzw. welche der in üblichen regelmäßigen Inspektionen festgestellten Schäden mit modernen UAS und Sensorik (Orthophotosysteme, Thermokamera etc.) erfasst und bewertet werden können. Bei der Italienschleife handelt es sich um eine Bogenreihe bestehend aus historischen Betonbögen aus den 20er Jahren und Stahlbetonbögen aus den 90er Jahren. Weiters wurden Teile der Bögen durch einen Stahlbetonplattenbalken sowie ein Stahltragwerk ersetzt, die ebenfalls Teil der Erfassung waren (siehe Detailpläne im Anhang). Aufgrund von Einschränkungen im Flugpfad aus der behördlichen Genehmigung erfolgte eine Übersichtsbefliegung (Orthofoto) sowie Erfassung der Bogenserie nur auf der Seite des ÖBB – Geländes (Abbildung 108). Technisch wäre auch eine vollständige 3D – Rekonstruktion problemlos möglich, dafür wäre jedoch die entsprechende Genehmigung und Aufnahme von allen Seiten erforderlich gewesen. Zur Erreichung des Forschungsziels von RISKMON wurde in Abstimmung mit den AG auf eine Vollerfassung verzichtet, da in erster Linie eine Auslotung der Erfassungstechniken im Vordergrund stand.

Ergebnisse der Befliegung:

Ausgewählte Ergebnisse der Befliegung sind u.a. ein hochauflösendes Orthofoto (Abbildung 109), die hochauflösende 3D – Rekonstruktion der aufgenommenen Bögen von der Südseite (Abbildung 110) mit einem Detailausschnitt zur Auflösung des 3D – Modells (Abbildung 111). Weitere beispielhaft dargestellte Ergebnisse sind Detailaufnahmen der Stahlbrücke mittels hochauflösender Bilder bzw. Thermografie (Abbildung 112) sowie die Auswertung von thermografischen Differenztaufnahmen (Abbildung 113). Weitere Aufnahmen und Ergebnisse finden sich im Anhang. Insgesamt lassen sich auf Basis der Recherchen, der Befliegung, der Analyse verfügbaren und eingesetzten Aufnahmetechniken sowie der Ergebnisse folgende Resultate ableiten:

- Eine hochauflösende 3D – Rekonstruktion der Bauwerke sowie Überlagerung und Vergleich mit Plangrundlagen sowie dem BIM der Betreiber ist problemlos möglich
- Voraussetzung dafür sind eine entsprechende Zugänglichkeit und Befliegung sowie gegebenenfalls Ergänzung mit anderen Aufnahmetechniken (z.B. Laserscan)
- Je nach den örtlichen Gegebenheiten werden Teilbereiche nicht mittels Drohnen erfassbar sein, für die Rekonstruktion ist hier eine Ergänzung durch manuelle Aufnahmen möglich
- Generell bestimmt die eingesetzte Sensorik und der Flugpfad bzw. Abstand die resultierende Auflösung und damit die Erkennbarkeit relevanter Schäden
- Rissbreiten größer 0,2 mm in den Alt- und Neubeton-Bogentragwerken als auch in den Stahlbetonplattentragwerken lassen sich sehr gut erkennen und bewerten
- Materialgrenzen als auch Sinterstellen und Wasseraustritte lassen sich ebenfalls sehr gut erkennen und bewerten
- Materialinhomogenität und Ausbesserungen sind vor allem an den Bogentragwerken über die hochauflösenden Bildaufnahmen erkennbar
- Bei Thermalaufnahmen sind die Veränderungen im zeitlichen Kontext wesentlich.

Zusammenfassend lassen sich die Erkenntnisse aus der Erfassung der Italienschleife in RISKMON wie folgt zusammenfassen: Alle sichtbaren, im Zuge der regelmäßigen Inspektion festgestellten Schäden und deren zeitliche Entwicklung lassen sich mit Hochleistungsdrohnen und Sensorik erfassen und quantitativ auswerten. Da im Zuge der Inspektion jedoch auch noch andere Aufnahmetechniken (z.B. Abklopfen) zur Anwendung kommen und eine vollständige Zugänglichkeit mit Drohnen nicht bei allen Objekten gegeben ist, kann diese nach dem derzeitigen Stand der Technik noch nicht ersetzt werden. Vielmehr sind Aufnahmen mittels berührungsloser Detektion eine wichtige Ergänzung und ein wesentlicher Schritt in Richtung Digitalisierung und quantitativer Zustandserfassung als Basis für präzise Zustandsprognosen.

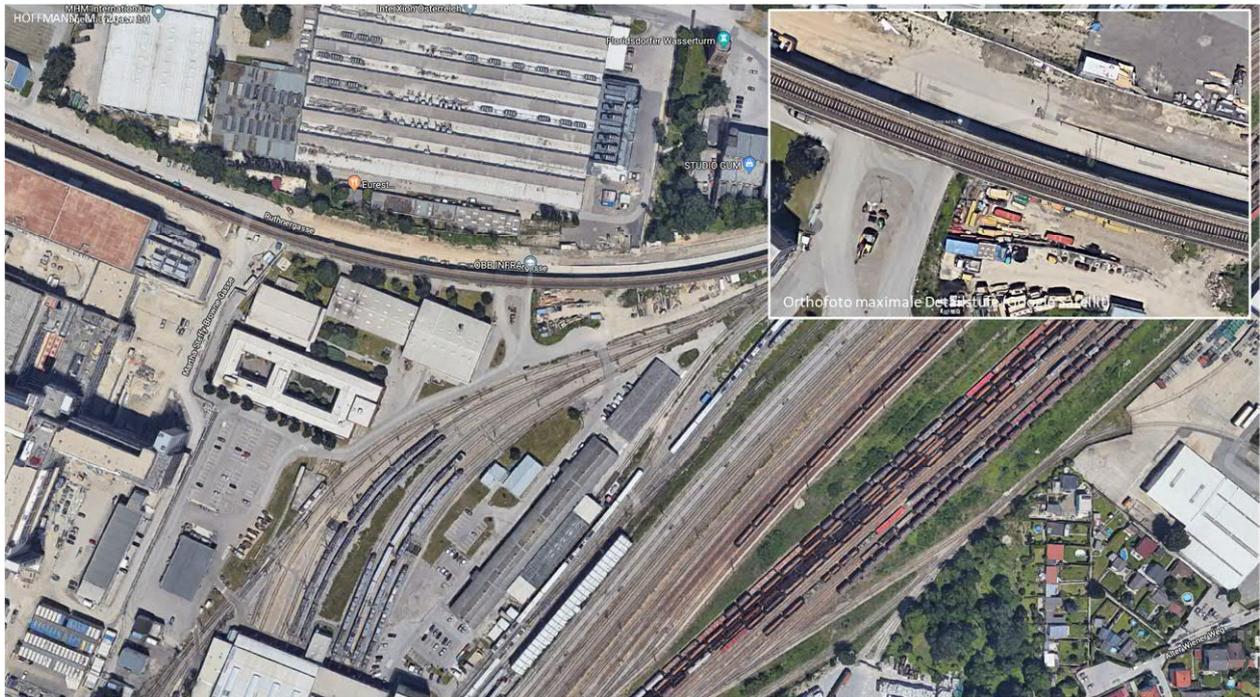


Abbildung 108: Italienschleife – Übersichtskarte (Google Maps)

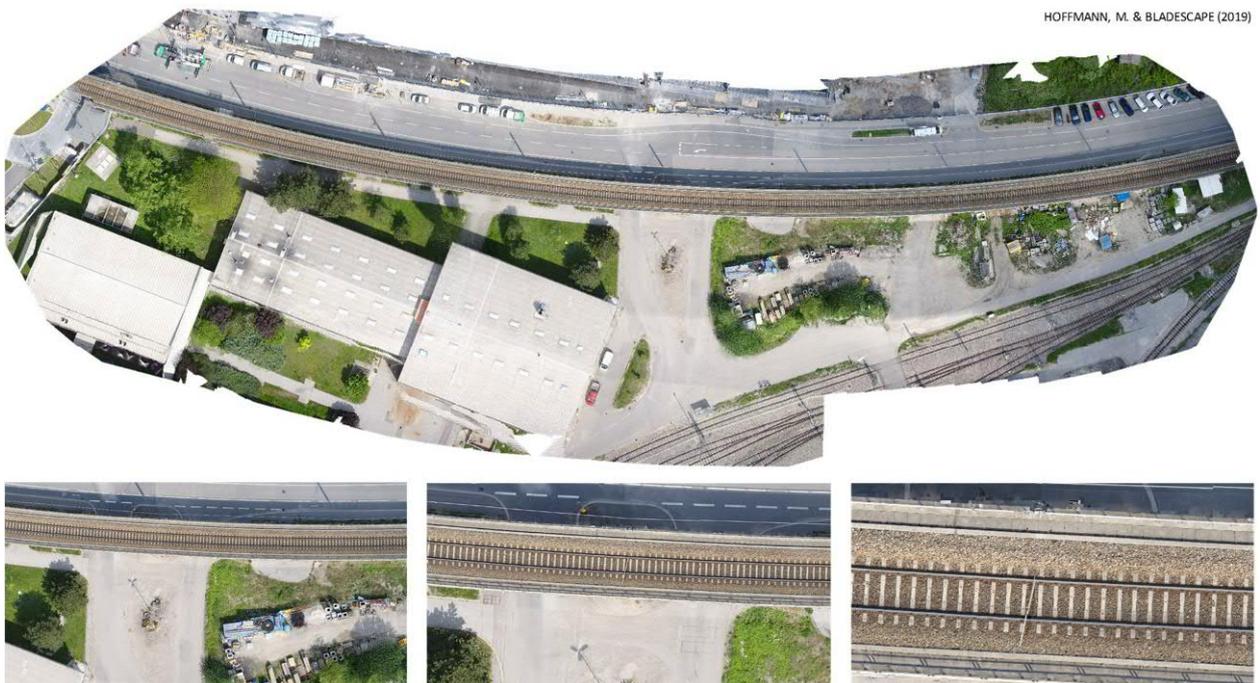


Abbildung 109: Italienschleife – Orthofoto aus RISKMON mit Detailzoom (high)



Abbildung 110: Italienschleife – 3D Modell und Ansicht Bögen 31 - 35 (high)

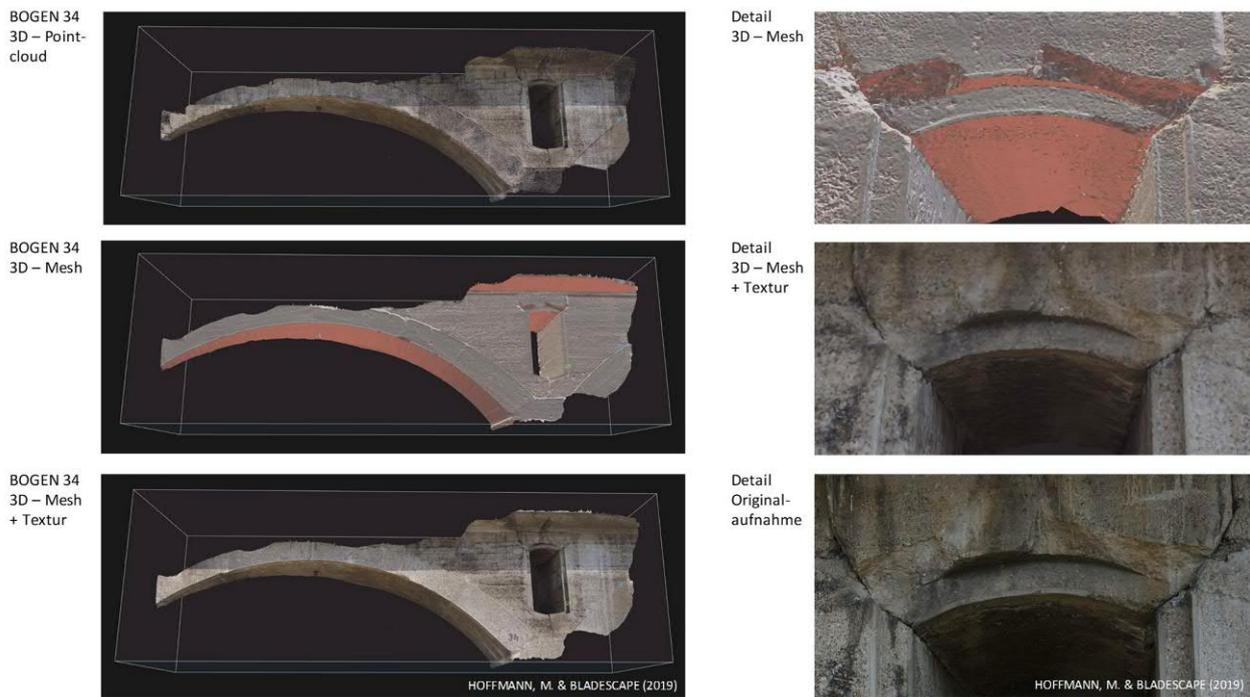


Abbildung 111: Italienschleife – 3D Modell und Ansicht Bögen 34 mit Details (high)

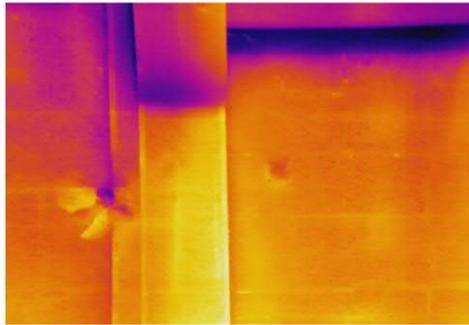
Unterbau bei
Stahlbrücke (Foto):
Mit Einzelrissen und
Ausbrüchen sowie
Aufsatzbeton



Überbau mit
Ausschnitt
Stahlträger (Foto)
– weitgehend
ohne erkennbare
Schäden



Unterbau bei
Stahlbrücke
(Thermo): Mit
Einzelrissen und
Ausbrüchen



Überbau mit
Ausschnitt
Stahlträger
(Thermo) –
weitgehend ohne
Schäden



Abbildung 112: Italienschleife – Beispiel Detailaufnahmen Stahlbrücke (vgl. Anhang)

Praktische Anwendung Thermografie Italienschleife:

Detektion von Delamination, Hohlstellen, Rissen, Materialinhomogenität, Verschmutzung, Nassstellen, Sinterfahnen und Einbauteilen

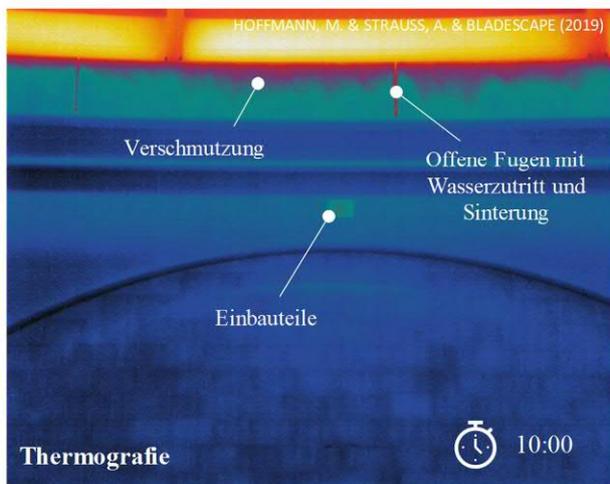


Abbildung 113: Italienschleife – Beispiel Auswertung Differenzaufnahme Thermografie

5.4.4 Murbrücke (ASFINAG)

Die Murbrücke G46 an der A2 Südautobahn wurde als Rahmentragwerk mit Stahlüberbau und biegesteifen Widerlagern aus Stahlbeton erbaut. Im Jahr 2011 wurde an der Stahlverbundbrücke eine kleine Instandsetzung (Korrosionsschutz Stahlverbundtragwerke, Betonsanierung, Erneuerung Brückenentwässerung) durchgeführt. Zuletzt wurde die Murbrücke G46 im Jahr 2015 durch das ZT-Büro Brandstetter geprüft und nachgerechnet. Die aktuelle Brückenprüfung erfolgt gemäß RVS 13.03.11 wie eine periodische Prüfung im 6-Jahres Intervall. Die vorliegende Prüfung ist außerplanmäßig, da sie im Rahmen des FFG - Forschungsprojektes RISKMON auf Basis von Drohnenaufnahmen zur Untersuchung der Möglichkeiten alternativer Aufnahmetechniken erfolgt.

Im Forschungsprojekt RISKMON erfolgte eine Teilbefliegung der Murbrücke auf der Nord- und Südseite mit hochauflösender Kamera und Thermografie, Von einer Befliegung von oben wurde Abstand genommen um en Verkehr nicht zu beeinträchtigen bzw. war eine Erfassung von der Unterseite aufgrund der Wasserführung nur begrenzt möglich (Abbildung 114). Dementsprechend lag der Schwerpunkt der Befliegung in der Erfassung, Rekonstruktion und Analyse der Seitenflächen der Brücke. Dementsprechend zeigt Abbildung 115 den Flugpfad und die rekonstruierten Ansichten auf der Nordseite und Südseite der Murbrücke. Technisch gesehen handelt es sich bei der Murbrücke G64 um einen Stahlbau mit einem orthotropen Plattensystem und zwei Hauptträgern im Abstand von ca. 6,50 m und einer Höhe von 2,20 m. Die Gesamtstruktur (Plattenbreite) beträgt ca. 17,50 m und ist zusammen mit den Detailplänen sowie Schadensmerkmalen im Anhang dargestellt. Aus den zur Verfügung gestellten Unterlagen lässt sich weiters eine im Jahr 2010 durchgeführte Brückenprüfung und eine im Jahr 2011 durchgeführte kleine Instandsetzung entnehmen, die ebenfalls im Detail im Anhang dokumentiert sind.

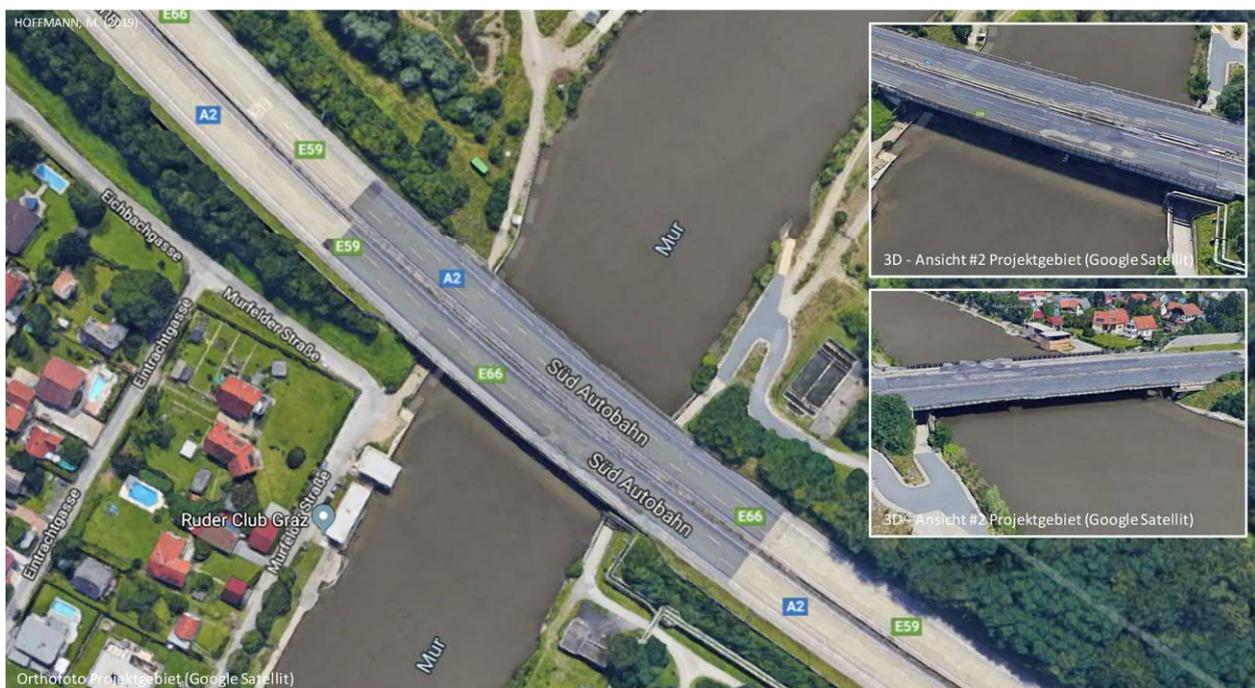


Abbildung 114: Murbrücke Nord/Süd – Übersichtskarte und Ansichten (Google Maps)

Ergebnisse der Befliegung:

Aus der Erfassung im Forschungsprojekt RISKMON mittels Bildaufnahmen und Thermografie lassen sich u.a. folgende Ergebnisse und Schlussfolgerungen ableiten:

- Für die vollständige 3D – Rekonstruktion sind entsprechende Genehmigungen und eine allseitige Erfassung erforderlich bzw. technisch möglich
- Die kleine Instandsetzung aus 2011 u.a. an der Widerlagermauer und Ausbesserung mit Rostschutz ist aus dem Bildmaterial eindeutig zu erkennen (Abbildung 116)
- Der Hauptträger und die Ausleger bzw. die Bauteile haben keine statisch relevanten Mängel (z.B. Beulen, fehlende Teile, etc.) und es liegen auch keine erkennbaren geometrischen Auffälligkeiten wie Beulen vor
- An einigen Stellen des Hauptträgers tritt jedoch bereits wieder Korrosion auf
- An den Randbalken in der Nähe des östlichen Widerlagers ist stellenweise Korrosion-erkennbar - an Nord- und Südseite der Widerlager Abplatzungen und Korrosion
- Die Steher der Lärmschutzwände weisen an der Unterseite beginnende Korrosion auf
- An den Entwässerungsröhrchen auf der Südseite sind stark korrodierende Auslässe zu detektieren. Nicht funktionstüchtige Auslässe können chloridhaltige Wässer auf die Hauptträger führen und Korrosionsprozesse starten – Handlungsbedarf besteht (Abbildung 117))

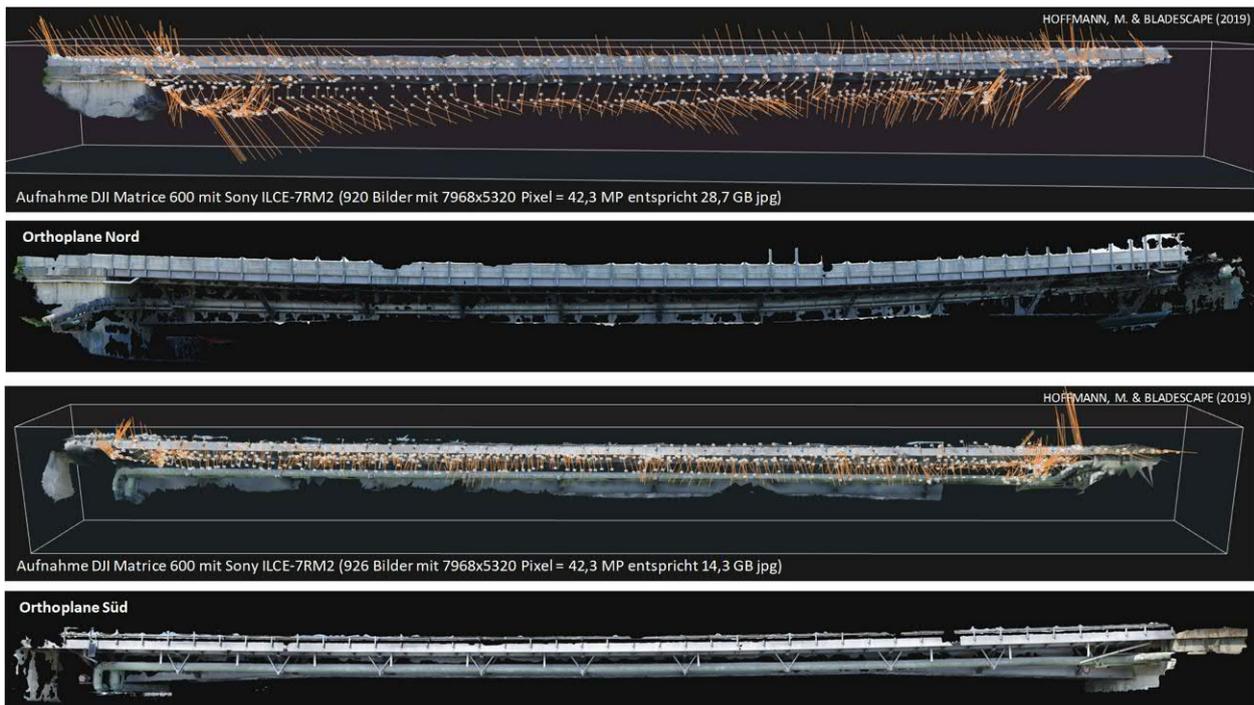


Abbildung 115: Murbrücke Nord/Süd – Flugpfad und Orthoplanes RISKMON

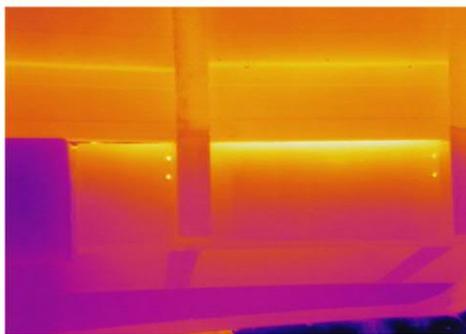
Widerlager
Nordseite links
(Foto): Sinterfahnen
ohne erkennbare
relevante Schäden



Widerlager
Nordseite rechts
(Foto): Graffiti,
Verschmutzung,
Ausbesserung (WL)



Widerlager
Nordseite links
(Thermo):
Sinterfahnen ohne
erkennbare
relevante Schäden



Widerlager
Nordseite rechts
(Thermo): Graffiti,
Verschmutzung,
Ausbesserung (WL)

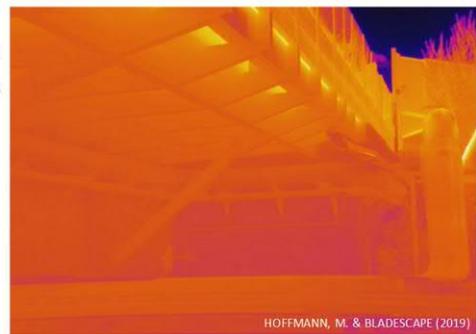


Abbildung 116: Murbrücke Nord/Süd – Detailbilder aus RISKMON (siehe Prüfbericht im Anhang)

HOFFMANN, M. & BLADESCAPE (2019)



Starke Korrosion mit Abplatzung und Undichtheit, Bruch und Folgeschäden zu erwarten → Austausch bei nächster IH.

Geringe Folgekorrosion an Querstrebe trotz Rostschutzmaßnahmen → Abtrag und Erneuerung Rostschutz bei nächster IH.



Abbildung 117: Beispiel für Fehleranalyse Murbrücke

Auf Basis der Teilbefliegung der Murbrücke lassen sich zusammenfassend folgende Aussage treffen. Die im Zuge der regelmäßigen Inspektion festgestellten Schäden und deren zeitliche Entwicklung lassen sich für alle einsehbaren Stellen mit modernen Hochleistungsdrohnen und Sensorik weitgehend quantitativ erfassen. Da bei der herkömmlichen Inspektion auch noch handnahe Prüfungen zur Anwendung kommen und nicht überall eine vollständige Zugänglichkeit besteht, sind diese nach dem Stand der Technik derzeit noch nicht zur Gänze ersetzbar. Vielmehr stellen UAS einen wesentlichen Schritt in Richtung Digitalisierung und quantitativer Erfassung dar.

5.5 Zustandsanalyse

Unter Zustandserfassung in der Brückenprüfung werden allgemein visuelle, messtechnische und experimentelle Erfassungen von Mängeln und Schäden sowie deren Beurteilung hinsichtlich Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit und Standsicherheit verstanden. Die Verkehrssicherheit ist gegeben, wenn von dem Bauwerk keine Gefährdung ausgeht, die Funktion erfüllt und eine gefahrlose Nutzung möglich ist. Die Dauerhaftigkeit wird als gegeben angesehen, wenn die (Brücken-)Anlage keinen progressiven Schädigungsverlauf aufweist und die erwartete Nutzungsdauer bei Umsetzung erforderlicher (Instandhaltungs-)Maßnahmen erreicht wird. Die Standsicherheit ist gegeben, wenn die Brücke und Elemente tragfähig sind, um die planmäßigen Lasten gemäß der Dimensionierung (bzw. Lastbeschränkung) zuverlässig aufzunehmen.³⁹

Das Ziel visueller Erfassungen ist eine standardisierte, augenscheinliche und schnelle Erfassung vorhandener Schäden mit begrenztem Aufwand. Visuelle Erfassungen werden mittels Gedächtnisnotiz, Checklisten, Fotos und Kurzbeschreibung periodisch durchgeführt und ermöglichen eine qualitative subjektive Indikation von Schäden, die Feststellung erforderlicher Sofortmaßnahmen sowie eines vertieften Prüfbedarfes. Messtechnische Erfassungen erlauben zerstörende bzw. zerstörungsfreie permanente (Monitoring) oder periodisch wiederholbare Aufnahmen von Ausmaß und Schwere von Schäden für die Beurteilung, Zustandsprognosen sowie von Materialparametern für die Nachrechnung von Anlagen. Die Zielsetzung für experimentelle Methoden liegt in der Entwicklung und Erprobung neuer Ansätze der Zustandserfassung. Sind diese effizient einsetzbar und standardisiert, können sie Teil der regulären messtechnischen Erfassung werden.⁴⁰

Die Schadensansprache und Bewertung ist national und international mittels kurzer verbaler Beschreibung bis hin zu umfassenden Schadenskatalogen für jeden Bauwerkszustand auf Elementebene illustriert. Die Zustandserfassung und Bewertung von Brücken in Österreich (Tabelle 20) erfolgt gemäß RVS 13.03.11 in 5 Zustandsnoten von sehr gut (Note 1) bis sehr schlecht (Note 5) und fasst die Ergebnisse der spezifischen Schadensansprache zusammen. Die Schadensbegutachtung erfolgt dazu nach elementspezifischen Schäden nach Ausmaß und Schwere sowie in Bezug auf Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit und Standsicherheit. Der Befund enthält die Ergebnisse und Bewertung der Schäden samt den erforderlichen Maßnahmen sowie der Gesamtbewertung des Brückenbauwerks. Die Schadensdokumentation zeigt ausgewählte Schäden und macht damit Begutachtung und Befund nachvollziehbar.

Tabelle 54: Klassifizierung der Zustände von Brücken in Österreich (lt. RVS 13.03.11)

Klassifizierung	Einschränkungen	Schäden	Sanierungsmaßnahmen	Note
Schlechter Zustand	Tragfähigkeit und/oder Funktionsfähigkeit	Sehr schwere Schäden	Instandsetzungs-/Erneuerungsarbeiten unverzüglich einleiten	5
Mangelhafter Zustand	Funktionstauglichkeit vermindert Tragfähigkeit noch nicht eingeschränkt	Schwere Schäden	Instandsetzung kurzfristig (innerhalb von 3 Jahren) einleiten	4
Ausreichender Zustand	Anzeichen einer Verminderung der Funktionstauglichkeit	Mittelschwere Schäden	Instandsetzung mittelfristig (innerhalb von 6 Jahren) einleiten	3
Guter Zustand	Keine Einschränkungen	Geringe, leichte Schäden, Baumängel	Behebung im Zuge von Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten	2
Sehr guter Zustand	Keine Einschränkungen	Keine, sehr geringe Schäden, Baumängel	Keine	1
Keine Beurteilung	k.A.	k.A.	k.A.	0

³⁹ vgl. MEHLHORN, G. et al. (2014)

⁴⁰ vgl. HOFFMANN, M. (2018a)

Tabelle 55: Übersicht Brückenelemente - Schadenstypen und Erläuterung (HOFFMANN, M, 2018)

B... Mittels Drohnenerfassung beurteilbar, NB... Mittels Drohnenerfassung nicht beurteilbar

BRÜCKENELEMENTE UND SCHADENSTYPEN		ALLGEMEINE ERLÄUTERUNGEN UND SANIERUNGSHINWEISE
1. Unterbau	1.1 Gründung NB - Lage (Verdrehung, Setzung) NB - Struktur (Bruch, Tragfähigkeit) NB - Auskolkung, Unterspülung NB - Trennung vom Bauwerk NB - Abtrag, Fehlstellen NB	Gründungsschäden sind sehr selten nachträglich bzw. Neubau behebbar. Möglich sind weiters Unterfangung, Anhebung des Bauwerks mittels Pressen und Einbau von Ersatzgründungen. Abtrag/Fehlstellen treten i.a. oberirdisch auf und werden lokal durch entsprechende Maßnahmen saniert.
	1.2. Widerlager, Flügel, Auflagerbank B - Lage (Verdrehung, Setzung) B - Struktur (Bruch, Tragfähigkeit) B - Auskolkung, Unterspülung B - Böschungssicherung/Entwässerung B - Abtrag, Fehlstellen Beton B - Risse, Korrosionsschäden B	Schäden in Bezug auf Lage und Struktur sind ebenfalls eher selten und meist nur durch einen Neubau oder Ersatz behebbar. Lageänderungen können in geringem Ausmaß später behoben werden. Risse, Fehlstellen oder Schäden an der Mauerwerksverblendung sind dagegen durch entsprechende Instandsetzung sanierbar.
	1.3. Stützen und Pfeiler B - Lage (Verdrehung, Setzung) B - Struktur (Bruch, Knicken) B - Auskolkung, Unterspülung B - Böschungssicherung/Entwässerung B - Abtrag, Fehlstellen Beton B - Risse, Korrosionsschäden B	Seltene Schäden an Struktur und Lage sind durch Entlastung mit Hilfskonstruktion und Austausch (bzw. Anhebung und Verstärkung) behebbar. Auskolkung und Unterspülung ist durch Sicherungen zu verhindern. Abtrags- /Riss- und Korrosionsschäden sind zeitnahe durch die üblichen Instandsetzungsmaßnahmen (Beton) zu sanieren.
	1.4. Schlepplatte NB - Lage (Verdrehung, Setzung) NB - Struktur (Bruch) NB - Risse, Korrosionsschäden NB	Können geringfügige Schäden oder Setzungen nicht durch Angleichung des Straßenbelags ausgeglichen werden, erfolgt meist ein Ersatz dieses Elements spätestens bei der nächsten Instandsetzung der Brücke.
2. Überbau	2.1 Wellrohrdurchlass B - Standsicherheit (Deformation) B - Korrosion, Ausbrüche (Blech) B - Schäden Böschungssicherung B	Deformationen der Querschnittsgeometrie deuten auf eine Überlastung und erfordern meist einen Austausch. Lokale Schäden oder Ausbrüche können durch kraftschlüssig verbundene Bleche und Korrosionsschutz saniert werden.
	2.2 Gewölbe/Bogen B - Lage (Verdrehung, Setzung) B - Standsicherheit (Gefüge, Steine) B - Mörtel/Gefügeschäden B - Risse, Aussinterungen B	Schäden der Lage sind ohne Ersatz kaum behebbar, im Gegensatz zu Schäden an Steinen und Gefüge, die meist durch Ausbesserung und/oder eine Verstärkung (Zusatzgewölbe) beherrschbar sind. Risse/offene Fugen werden i.a. verpresst bzw. neu hergestellt.
	2.3 Platten-/Plattenbalken/Rahmen B - Lage (Verdrehung, Setzung) B - Standsicherheit (Risse, Bruch) B - Überlastung (Schub/Biegung) B - Korrosion, Abplatzungen B - Betondeckung, Aussinterungen B - Risschäden allgemein B - Schäden Vorspannung ~	Schäden der Lage sind i.a. durch Anhebung und Neueinstellung der Lagerung behebbar. Probleme mit der Standsicherheit sowie zu hohe Durchbiegung erfordern hingegen meist einen Ersatz oder Verstärkung des Überbaus (Aufbeton, Lamellen, externe Vorspannung) bis zum Umbau als Rahmen. Lokale Schäden an Beton und Bewehrung können hingegen durch einfache Ausbesserung behoben werden.
	2.4 Kastenquerschnitte B - Lage (Verdrehung, Setzung) B - Standsicherheit (Risse, Bruch) B - Überlastung (Schub/Biegung) ~ - Korrosion, Abplatzungen B - Betondeckung, Aussinterungen ~ - Risschäden allgemein B - Schäden Vorspannung ~	Die Schäden an Kastenquerschnitten sind denen an Platten-/Plattenbalken grundsätzlich ähnlich. Durch die Auflösung des Vollquerschnitts können die Schäden jedoch innerhalb und außerhalb des Kastens auftreten. Kästen sind steifer, weshalb sich ein Versagen nicht durch ein biegeweicheres Verhalten ankündigt. Reichen die üblichen Ausbesserungen nicht, ist vielfach ein Ersatz notwendig (Vorspannung, Kasten).

	2.5 Verbundbrücken B - Lage (Verdrehung, Setzung) B - Standsicherheit (Dübel, Risse) B - Überlastung (Beulen etc.) ~ - Korrosion, Abplatzungen Beton B - Bruch Verbände B - Risschäden Anschlussbereiche B - Korrosion, Risse Träger/Kasten B	Differenzierung zwischen Stahl- und Betonbau sowie Gesamtsystem. Ein mögliches Versagen kündigt sich durch Spannungsrisse und Beulen der Stege an. Schäden an Trägern und Hohlkasten können durch Aufschweißen von Blechen oder Verstärkung behoben werden. Die Fahrbahnplatte kann komplett ausgetauscht (Verbund, Korrosion Kopfdübel) oder mittels Aufbeton verstärkt werden. Sonstige Schäden wie o.a.
3. Lager	3.1 Elastomerlager - Risse (Elastomer), Wasserzutritt B - Korrosion Platten B - Beeinträchtigung Beweglichkeit ~ - Schädigung Sockel/sonst. Teile NB	Große Risse und frei liegenden, korrodierte Bleche erfordern i.a. einen Austausch. Risse und Oberflächenschäden werden mittels Anstriches/Spachtelung mit kaltvulkanisiertem Elastomer bzw. durch Abschälen und Warmvulkanisation saniert.
	3.2 Rollen-/Kipplager - Risse, Bruch von Lagerteilen B - Korrosion Zylinder, Leiste, Platten B - Beeinträchtigung Beweglichkeit ~ - Schädigung Sockel/sonst. Teile ~	Bei Rissen oder Bruch von Lagerteilen erfolgt meist ein Austausch (z.B. durch Elastomerlager). Instandsetzung erfolgt über Anhebung des Überbaus, Zerlegung und Sandstrahlen, Aufbringen Korrosionsschutz, Sanieren Sockel/Pfeiler/Widerlager und Wiedereinbau.
	3.3 Topflager - Risse, Bruch von Lagerteilen B - Korrosion Stahltopf-/Deckel B - Beweglichkeit (Austritt Kissen) ~ - Schädigung Sockel/sonst. Teile ~	Bei strukturellen Schäden erfolgt meist ein Austausch des gesamten Lagers oder der beschädigten Lagerteile. Schäden an Sockel/Pfeiler und Widerlager durch konventionelle Betoninstandsetzung.
	3.4 Kalottenlager - Risse, Bruch von Lagerteilen B - Verschleiß PTFE, Spalthöhe NB - Korrosion Kalotte/Gleitplatte ~ - Beeinträchtigung Beweglichkeit ~ - Schädigung Sockel/sonst. Teile ~	Strukturelle Schäden sind meist auf Naturereignisse oder falsche Dimensionierung/Ausführung zurückzuführen und erfordern i.a. einen Austausch. Bei Verschleiß Ausbau und Instandsetzung im Werk. Sockel/Pfeiler/Widerlager wie oben sanieren.
4. Fahrbahnübergangskonstruktion	4.1 Lamellenkonstruktion - Mechanische Beschädigung B - Blockierte Dehnwege ~ - Schäden Anker/Fahrbahn ~ - Korrosion/undichte Profile ~ - Schadhafte Entwässerung ~	Bei Austausch älterer Konstruktionen ist der gesamte Ankerbereich zu erneuern, was bei neuen geschraubten FÜK nicht nötig ist. Blockierte Dehnwege und Schäden bei Fahrbahn-/Ankerbereich sowie Mängel an der Entwässerung können lokal behoben werden. Korrodierte & undichte Profile sind auszutauschen.
	4.2 Fingerkonstruktionen - Mech. Schäden (z.B. Finger) B - Blockierte Dehnwege, Versatz ~ - Schäden Ankerbereich/FB ~ - Korrosion/undichte Profile ~ - Schadhafte Entwässerung ~	Robuste Konstruktion. Nach Ausmaß mechanischer Schäden Nachjustierung und Teilaustausch sowie Sanierung angrenzender Bereiche. Häufig Sekundärschäden aufgrund Verschmutzung und undichtem Entwässerungssystem, weshalb eine laufende Kontrolle und Reinigung wichtig ist.
	4.3 Mattenkonstruktionen - Mech. Schäden (Matte, Anchl.) ~ - Überwölbung, Verquetschung ~ - Schäden Ankerung/Fahrbahn ~	Durch Verschraubung mit Unterkonstruktion bei (üblichen) mechanischen Schäden leicht austauschbar. Kleine Schäden in Anker/Fahrbahn verspachteln/vergießen, bei großen Schäden Erneuerung.
	4.4 Elastische Belagsdehnfugen B - Risse, Ausbrüche Dehnfuge B	Durch dichte Ausführung ohne bewegliche Teile meist mechan. Beschädigung mit einfachem Austausch (mit/ohne Belag) bzw. Öffnen von Anschlussflanken zum Belag.

5. Abdichtung und Entwässerung	5.1 Tragwerksabdichtung NB - Schäden groß (bek./unbekannt) NB - Schäden kleinflächig (Ort bekannt) NB	Sind die Schäden kleinflächig und örtlich bekannt, kann ein lokaler Austausch erfolgen. In allen anderen Fällen ist ein voller Austausch nötig (Folgeschäden).
	5.2 Abdichtungsentwässerung & Tagwasserabläufe NB - Ausführungsmängel NB - Funktionsausfall NB - Folgeschäden (Ausblühungen, Nässestellen, Korrosion etc.) NB	Zusinterung, Verlegung und lokale Nässestellen sind durch lokale Instandsetzung behebbar. Sind Schäden nicht lokalisierbar oder schwer instand zu setzen, wird ein lokaler Ersatz oder komplette Erneuerung erforderlich.
	5.3 Abläufe & Entwässerung - Ausführungsmangel (zu kurz) ~ - Gebrochene Rohre/Befestigung B - Korrosion/Sinterung/Verlegung B - Mangel Abdichtung/Anschlüsse B - Beschädigung Ausbrüche Schacht B - Verschmutzung Einläufe ~	Ausführungsmängel, gebrochene Rohre und Befestigungen bis hin zu Ausbrüchen an Rohren und Schächten sind meist erkennbar und umgehend durch Instandsetzung oder Erneuerung zu sanieren. Undichtigkeiten oder Verlegungen sind an Nässestellen und Ausblühungen erkennbar und nach Möglichkeit zu lokalisieren und lokal instand zu setzen.
6. Randbalken	6.1 Randbalken - Mangel Ankerung (Absturzgef.) NB - Betonschäden, Korrosion B - Risschäden B - Lockere Bordsteine NB - Fugenschäden ~ - Abplatzung, Ausbrüche Gehw. B - Bewuchs, Schmutz Gehw. B (betriebliche Instandhaltung)	Mängel in der Ankerung bis hin zu Absturzgefahr sowie weitreichende Betonschäden und (Anker-)Korrosion führen in der Regel zu einem lokalen Ersatz bzw. Austausch der Randbalken. Lokale Schäden an Beton, Fugen und Oberfläche werden entweder durch aperiodische Instandhaltung- oder im Zuge periodischer Instandsetzung behoben. Bewuchs und Verschmutzung sind umgehend zu beseitigen.
7. Ausrüstung	7.1 Geländer, Leit-/Schutzeinrichtungen. - Bruch, Schädigung Elemente B - Mangel Ankerung ~ - Korrosion Leitschienen Stahl B - Korrosion/Abplatzung Leitwände Beton B - Schäden Beschichtung/Anstrich B	Aus Sicherheitsgründen erfolgt bei Bruch, Ankermängeln oder substanzieller Schädigung je nach Ausmaß meist ein lokaler Austausch oder Gesamtersatz. Bei lokalen Schäden/Korrosion kann eine Entrostung und Anstrich (Stahl) oder kleinflächige Reparatur (Beton) erfolgen.
	7.2 Lärmschutzwände (LSW) - Schäden Ankerung, Steher ~ - Schäden Paneel B - Schäden Spritzschutz B - Schäden Beschichtung/Anstrich B	Um einen Absturz der LSW zu verhindern, sind entsprechende Schäden an der Ankerung oder Paneelen umgehend zu beseitigen. Ein Austausch der gesamten LSW erfolgt meist aufgrund substantieller Schäden oder bei einer generellen Instandsetzung.
	7.3 W.Stege, Beleuchtung, Schilder - Schäden Ankerung, Bruch Teile ~ - Korrosion Streben, Stufen etc. B - Mechan. Schäden Schilder B - Schäden Beleuchtung B	Für Arbeitssicherheit und Kontrolle ist eine permanente Begehbarkeit sicherzustellen. Schäden an Wartungsstegen und Zugängen werden i.a. durch Austausch behoben. Bei Schildern und Beleuchtung erfolgt entweder eine lokale Reparatur oder Austausch.
8. Fahrbahn	7.1 Fahrbahn Straßenoberbau - Einzelrisse (Längs, Quer, Naht) B - Netzrisse, Verdrückungen B - Oberflächenschäden B - Querebenheit (Spurrinnen) ~ - Längsebenheit ~ - Griffbarkeit, Textur ~	Aus Sicherheitsgründen erfolgt bei Bruch, Ankermängeln oder substanzieller Schädigung je nach Ausmaß meist ein lokaler Austausch oder Gesamtersatz. Bei lokalen Schäden/Korrosion kann eine Entrostung und Anstrich (Stahl) oder kleinflächige Reparatur (Beton) erfolgen.
	7.2 Fahrbahn Gleis, Schwellen, Befestigung - Gleisschäden B - Schwellenschäden (Holz/Beton) B - Schotterbett ~ - Bewuchs B	Aus Sicherheitsgründen erfolgt bei Bruch, Ankermängeln oder substanzieller Schädigung je nach Ausmaß meist ein lokaler Austausch oder Gesamtersatz. Bei lokalen Schäden/Korrosion kann eine Entrostung und Anstrich (Stahl) oder kleinflächige Reparatur (Beton) erfolgen.

Aus der Literaturrecherche, den Laborversuchen sowie dem Einsatz und der Bewertung der Ergebnisse in RISKMON zeigt sich, dass die Detektion des überwiegenden Anteils von typischen Merkmalen und Schäden mittels UAS grundsätzlich möglich ist. Unabhängig von der technischen Entwicklung und den bereits jetzt bestehenden Möglichkeiten mit unbemannten Luftfahrzeugsystemen und Sensorik sind diese nur eines von möglichen Werkzeugen einer ganzheitlichen Erfassung. Je nach Situation kann ein Einsatz nur begrenzt möglich sein bzw. kann es effizientere Methoden geben. Wie bei jedem Werkzeug ist daher die richtige Auswahl, Planung, Handhabung und Analyse entscheidend für gute Ergebnisse. Wesentliche Aspekte aus RISKMON dafür sind:

- **Strategieentwicklung:** Aufbauend auf Einsatzerfahrungen schrittweise Entwicklung und Umsetzung einer ganzheitlichen Strategie zur Digitalisierung im Asset Management Zyklus
- **Flugplan:** Ein auf das Erfassungsziel und die Verhältnisse optimal abgestimmter, wiederholbarer Flugplan und eine reproduzierbare Detektion der erfassten Merkmale und Schäden. Die Flugplanung in Kombination mit dem Gerätesetting sind für die Qualität erfolgsentscheidend. Die BLADESCAPE-Methode verbindet dabei die Anforderungen mit den Rahmenbedingungen und leitet daraus eine optimierte Flugplanung ab.
- **Sensoren:** Die Zielsetzung, Sensorauswahl und erwartete Auflösung ist entscheidend für den Flugplan und gute Ergebnisse – für Digitalisierung hohe Auflösung wählen (> 36 MP Kamera), aber nicht immer liefern die hochauflösendsten Sensoren die besten Ergebnisse
- **Prozessierung:** Zur Vermeidung von Datenfriedhöfen und Insellösungen sowie späteren Vergleich ist eine genaue, saubere Prozessierung und Verwaltung der abgelegten Daten essenziell. Fehler in der Datenerfassung können aber in der Prozessierung nicht mehr wettgemacht werden.
- **Standardisierung:** Ein effizienter Einsatz von UAS auf Netzebene erfordert eine schrittweise Standardisierung aller Prozessschritte und Abstimmung mit Unternehmensprozessen
- **Voranalyse:** Eine abgestufte Herangehensweise sowie Voranalyse in Bezug auf markante gefährdete Bereiche sparen Ressourcen und Aufwand von Erfassung bis zur Auswertung
- **Wiederholung:** Erst aus wiederholten Erfassungen lassen sich Änderungen ableiten – diese können periodisch im Zuge von Prüfungen bzw. unmittelbar erfolgen (z.B. Thermografie)
- **Referenzierung:** Zur Lokalisierung der Fehlerstellen und für die Feststellung von Veränderungen bei wiederholter Erfassung ist auf eine stimmige bei Bauwerken idR vertikale Referenzierung zu achten.
- **Ausbildung/Organisation:** Ein effizienter Einsatz des Werkzeugs UAS durch Infrastrukturbetreiber erfordert neben dem Sammeln von Erfahrungen durch den regelmäßigen Einsatz den schrittweisen Aufbau eines entsprechenden Knowhows im Unternehmen selbst. Es wird eine zentrale Stelle zur Koordinierung empfohlen, um laufend auf den Erfahrungen der einzelnen Anwendungen aufbauen zu können und eine einheitliche Vorgehensweise zu entwickeln. Expertise zu folgenden Themen ist intern oder extern zu berücksichtigen:
 - für die Ausschreibung, Vergabe, Befliegung, Einsatzkoordination und Umsetzung von Erfassungen mit UAS und berührungslosen Erfassungsmethoden
 - für Behördenwege zur Fluggenehmigungserteilung und Sicherheit der Befliegung (z.B. im innerstädtischen Bereich, über Wasser etc.)
 - für nachhaltige Datenspeicherung, Datenaufbereitung, Datenanalyse und der Schadensdetektion mit Algorithmen und KI (Anwendung, Entwicklung, Wartung)

- für digitale Erfassung und Schadensbewertung als Schnittstelle zu BrückenexpertInnen des RVS Bewertungsteams von Kunstbauten, Naturgefahren etc.
- für die Umwandlung der digitalen Analyse- und Assessmentergebnisse in ein nachhaltiges Reporting (Gutachten und Berichte)
- für Softwareprodukte zur kontinuierlichen Anpassung und Einsatz von neuen Softwareprodukten und Werkzeugen sowie Weiterentwicklung Asset Management
- für Sensortechnik (non destructive testing) zur Analyse und Interpretation der Erfassungsdaten und das Training der KI

5.6 Vergleich und SWOT-Analyse

Eine systematische Evaluation basiert auf Zielsetzungen, Kriterien und Indikatoren für eine qualitative oder quantitative Analyse. Als Basis für Entscheidungen ist zudem ein Vergleich mit Standards, bereits erzielten Resultaten oder Handlungsalternativen im Verhältnis zu den erforderlichen bzw. eingesetzten Ressourcen erforderlich. Die für RISKMON gewählte SWOT – Analyse dient dazu in den Handlungsfelder Stärken auszubauen, Schwächen zu minimieren, Chancen zu nutzen und mögliche Bedrohungen rechtzeitig zu erkennen. Die SWOT – Analyse zum **Einsatz mobiler Sensorik in der Zustandserfassung von Bauwerken** fasst die Ergebnisse von RISKMON im Vergleich zu den Standards und Methoden übersichtlich zusammen (Tabelle 56).

Aus Sicht von RISKMON liegt die größte Stärke in der quantitativen Erfassung von Bestands- und Zustandsdaten, was bessere Zustandsprognosen sowie Einsparungen durch einen effizienten Einsatz von Maßnahmen im Lebenszyklus erlaubt. Die größte Schwäche liegt in der richtigen schrittweisen Umsetzung mit gezielten Investitionen in Forschung, Software und IT sowie Ausbildung und Integration in die Unternehmensprozesse. Die größte Chance liegt darin, als moderner Betreiber effiziente, transparente Entscheidungssysteme aufzubauen und dabei erhebliche Effizienzpotenziale zu heben. Die größten Risiken bestehen in einer mangelhaften Strategie und Umsetzung, wodurch trotz Investition weder die angestrebten Effizienzgewinne noch die notwendige Akzeptanz im Unternehmen erreicht werden können.

Tabelle 56: SWOT – Analyse Einsatz mobiler Sensorik in der Zustandserfassung von Bauwerken

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Konzeption für die Digitalisierung & Integration in Bestandssysteme vorhanden • Konkrete Anwendungsbeispiele mit Formaten und Instrumenten der Datenauswertung vorhanden • Hochqualitative Datenerfassung in Abhängigkeit der Gerätewahl und der Flugplanung zu großen Teilen bereits einsetzbar • Verbesserte Zustandserfassung und Dokumentation als Basis für das Asset Management belegt • Exakte Wiederholbarkeit für quantitative Analysen von Zustandsveränderungen und exakten Prognosen • Klar strukturiertes Datenmanagement in Bestandssystemen für rasche Verfügbarkeit gezeigt • Maximierung der Sicherheit und Verfügbarkeit der Infrastruktureinrichtungen möglich • Effizienzsteigerung durch Optimierung des Mitteleinsatzes und der Lebensdauer erreichbar • Beweissicherung vor, während und nach Umsetzung von Maßnahmen /als Erfolgskontrolle sinnvoll 	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionen in Software, IT -Systeme und Schulungen bei Betreibern nötig • Trotz technologischer Entwicklung ist Detektionsrate noch weiter verbesserbar • Schrittweise Entwicklung und Anpassung von Unternehmensprozessen für das Nutzen der Vorteile und des nachhaltigen Mehrwertes wesentlich • Integration und Akzeptanz der digitalen Technologie in bestehende Bewertungsverfahren muss forciert werden • Hohe fachliche Anforderungen an Flugplanung und Geräteauswahl um Sicherheit zu gewährleisten • Schrittweise Expertenausbildung intern für die Umsetzung der Prozessschritte zu empfehlen
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung des Unternehmens und Realisierung von Effizienzgewinnen • Moderne Bauwerksprüfung mit objektiven Prozessabläufen • Schaffung eines attraktiven Berufsfeldes durch Bewahrung vorhandenen Wissens & neue Technologie 	<ul style="list-style-type: none"> • Strategieentwicklung und Umsetzung erfolgt unzureichend bzw. nicht gemäß neuen Erkenntnissen bzw. ohne Koordination Reibungsverluste und Stillstand • Auswahl falscher Experten und Dienstleister, ungeeigneter Softwaretools und Sensorik führt zu schlechten Ergebnissen • Durch mangelndes Change Management werden neuen Ansätze, Methoden und Tools durch die MitarbeiterInnen nicht angenommen

5.7 Ergebnisse und Empfehlungen

Das Forschungsprojekt RISKMON von BMVIT, ÖBB, ASFINAG und FFG erforscht die Konzeption, Umsetzung und Integration teilautomatisierter Inspektionen mittels unbemannter Luftfahrzeugsysteme und Sensorik (UAS). Im **Einsatzbereich Kunstbauwerke** geht es um eine Bestands- und Zustandserfassung von Brücken und Stützmauern mit unbemannten Luftfahrzeugen und Sensorik mit Schadensauswertung, Visualisierung, Einbindung Bestandssysteme und Einsatzempfehlung. Dementsprechend bauen die Ergebnisse und Empfehlungen auf die bisherige Anwendung sowie der Forschungsergebnisse zu Asset Management und Lebenszykluskosten generell bzw. von RISKMON auf und können wie folgt zusammengefasst werden⁴¹:

- **Strategieentwicklung:** Aufbauend auf Einsatzerfahrungen schrittweise Entwicklung und Konkretisierung der Digitalisierungsstrategie in Richtung Digitalisierung, BIM, Asset Management, LCC und Prozessmanagement in einer Arbeitsgruppe mit internen/externen Experten
- **Forschung und Entwicklung:** Bestehende Asset Management Systeme basieren auf einer starken Abstraktion und Simplifizierung, wodurch der Nutzen genauer Erfassungen weitgehend verloren geht. Sinnvoll ist eine schrittweise Implementierung der neuen Erfassungsform und einer einhergehenden Entwicklung der Asset Management Systeme. Wesentliche Entwicklungsbereiche bzw. Forschungsfelder zur Verbesserung sind:
 - Sammeln von Erfassungsdaten und Generieren von Erfahrungen zur weiteren spezifischen Konkretisierung von Bedarf und Möglichkeiten. Wesentlich dabei, die Bündelung der Erfahrungen und somit die wachsende Expertise.
 - Konzeption und schrittweise Entwicklung der Softwaretools für die effiziente Prozessierung der Daten
 - Schrittweise Standardisierung der Sensoren für „non destructive testing“ und Ergebnisinterpretation
 - Toolbox mit Schadensdatenbank sowie Evaluierung der Detektionsraten
 - Zustandsbewertung und Prognosemodelle für räumliche verteilte Schadensbilder
 - Lebenszykluskostenmodelle für die Optimierung komplexer Systeme
 - Implementierung eines Change Prozesses für die Umsetzung der Digitalisierung
- **Schulung und Weiterbildung:** Die effiziente Umsetzung der entwickelten Strategien und Anwendung erfordern die Bewahrung von bestehendem Wissen und darauf aufbauend KnowHow-Entwicklung für die neuen Methoden und Anwendungen als Basis für eine effiziente Umsetzung im Unternehmen mit empfohlener
 - Definition einer zentralen Koordinierungsstelle
 - Definition von Ansprechpartnern in den einzelnen Fachbereichen und Auswahl diesbezüglich motivierter Mitarbeiter
 - Schulungen und Training der Mitarbeiter zum Einsatz der neuen Methoden
 - Prozessmanagement und Begleitung der Umsetzung
 - Entwicklung und Ausbildung eines Interfaces von Digitalisierungsverantwortlichen mit dem klassischen hochqualifizierten Brückeninspektionsteam
- **Praktische Umsetzung:** Das Ziel in der praktischen Umsetzung besteht in der schrittweisen Implementierung der neuen Erfassungsmethoden und in der weitgehenden Standardisierung der Prozesse mit Umsetzung aller wesentlichen Tätigkeiten in einfach zu nutzenden Softwaretools.

⁴¹ vgl. VEIT, P. (1999); HOFFMANN, M. (2018a)

Empfohlene Schritte sind

- Kombination praktischer Anwendungen, deren schrittweise Entwicklung und der stufenweisen Integration in AM – Konzept
- Organisationsentwicklung und Change Prozess zur Akzeptanzsteigerung
- Stufenweise Weiterentwicklung der Softwaretools
- Schulungen und Training der Mitarbeiter zu Experten
- **Kommunikation:** Wesentliche Voraussetzung jeder erfolgreichen Umsetzung sind eine klare Kommunikation der Zielsetzungen und der erwarteten Ergebnisse
 - Vorteile und Potenziale der neuen Methoden
 - Unternehmensstrategie und erwartete Ergebnisse generell
 - Umsetzungsplan, Anforderungen und Kommunikationsstrategie intern
 - Kommunikation von Strategien, Etappenzielen und Ergebnissen intern/extern

6 Zustandserfassung Naturgefahren

6.1 Konzeption Zustandserfassung

Die Zielsetzung von RISKMON besteht in der Konzeption und Anwendung teilautomatisierter Erfassung und Umsetzung von Maßnahmen mit UAS bei Naturgefahren mit Anwendungsbeispielen und Vergleich zu bisherigen Herangehensweisen. Dazu ist eine Vorgehensweise mit den folgenden Aspekten zu konzipieren:

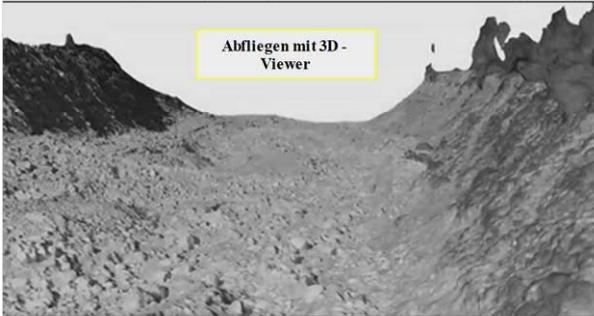
- Grundsätzliche Konzeption eines durchgängigen Ansatzes für die Zustandserfassung und Gefahren Abwehr mittels mobiler Sensorik und neuen Ansätzen
- Zustandserfassung, Maßnahmenvorbereitung und Einsatz von UAS vor/während/nach Naturgefahren
- Erfassen Rutschhang/Vermurung davor/danach mit Mengenermittlung (Abbildung 118)
- Analyse der methodischen Grundlagen und Daten für die Wahl des Einsatzzeitpunktes von Lawinensprengungen mittels UAV
- Konzeption eines Ablaufes mit Vorbereitung und Umsetzung Lawinensprengungen mit UAS-Einsatz (Abbildung 119)
- Datenverarbeitung mit Beurteilung der Ergebnisse zusammen mit Aufwandsermittlung
- Messung von Schneehöhe bzw. Schneemächtigkeit mit Vergleich Airborne und Manuell
- Konzeption der Abläufe, Anforderungen und Einbindung in bestehende Systeme (ASFINAG, ÖBB)
- Ausarbeiten Einsatzempfehlungen mit Szenario-Analyse sowie möglicher Folgen Ausrollung auf Basis eines Lebenszykluskostenansatzes
- Entwicklung von Empfehlungen für das aktive Management von Naturgefahren bzw. insbesondere Lawinhängen sowie der Ausschreibung zugehöriger Leistungen (UAV)

Die Aufklärung und Erfassung bei Naturgefahren mittels UAS kann grundsätzlich vor, während und nach Ereignissen erfolgen, erhöht damit die Zugänglichkeit und ist weitgehend gefahrlos. Auf Basis fotogrammetrischer Auswertungen sowie von Laserscans können flächige Massenveränderungen durch Ereignisse bzw. vor und nach Maßnahmen quantifiziert werden. Der Anwendungsfall Lawinensprengung setzt entsprechende Sicherheitsvorkehrungen und technische Vorbereitungen sowie Abklärung der Einsatzbedingungen voraus. Für die Auswertung des Rutschhanges kann auf vorhandene Daten (Ready2fly) zurückgegriffen werden und die (teilautomatisierte) Auswertung und Darstellung der Veränderungen sowie damit verbundene Volumenermittlung verbessert werden. Für eine erfolgreiche Umsetzung ist die (teil-)Automatisierung der Auswertung und Klärung der Einbindung erfasster Daten (Datawarehouse, Bereinigung, Sicherung, Auswertung) wesentlich. Der potenzielle Nutzen liegt im flexiblen Einsatz und gefahrlosen Aufklärung bei Naturgefahren mit der Möglichkeit messtechnischer Auswertungen (Lawinen, Rutschung) sowie der Konzeption und Umsetzung sicherer, kostengünstiger und präziser Lawinensprengungen mit UAV.

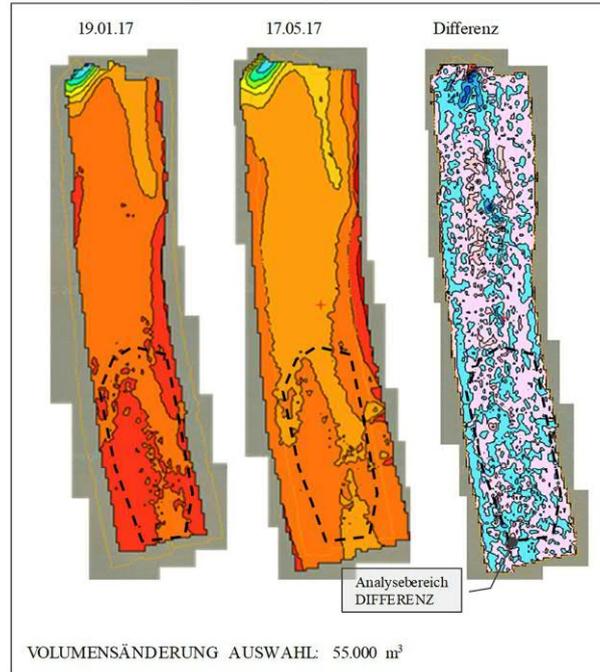
Befliegung und Erfassung des Einsatzgebietes



Auswertung Lidar, Fotogrammetrie (3D – Modell, TIN)



Auswertung des Einsatzgebietes und Differenz



vgl. Bilder: Bladescape (RZF), HOFFMANN, M. (Waterway Asset Management WAMS)

Abbildung 118: Konzept der Erfassung von Naturgefahren am Beispiel einer Vermurung mit Erfassungsgebiet, mehrmaliger Aufzeichnungen und Differenzermittlung (Volumen)

<p>VORGEHENSWEISE:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Abklärung rechtlicher Rahmen 2. Vorbereitung Technik (Thermokamera, Infrarotsensor, Auslöser) 3. Auswahl Lawinengang mit Wetterstation/Warnsystem 4. Laserscan Hang vor/im Winter (Dicke Schneedecke) 5. Ausbringung von Sensorik mit Drohnen 6. Aufklärung vor Sprengung (Thermokamera) 7. Ausbringung Sprengladung & Zündung (4-Augen-Prinzip) 8. Ereignisdokumentation Sprengung 9. Szenario-Analyse mit Kosten und Nutzen sowie Risiken 			
<p>SZENARIO #0: Nullvariante</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abschätzung Häufigkeit (p) von Lawinenabgängen • Lawinenhänge, gesetzte Maßnahmen und jährliche Kosten (ÖBB/ASFINAG) • Abschätzung Folgen für Basisfall ohne Maßnahmen 	<p>SZENARIO #1: Konventionell</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kosten Sprengung konventionell ÖBB/ASFINAG) • Einsatzbedingungen und Witterung • V1: Präventivsprengung (kl) • V2: Anlassfall (groß) 	<p>SZENARIO #2: Drohneinsatz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Testsprengung mit Drohne mit Einsatzdok und Aufwand • Ausloten Einsatzbedingungen und Witterung • V1: Präventivsprengung (kl) • V2: Anlassfall (groß) 	<p>SZENARIO #3: Lawinerverbauung</p> <ul style="list-style-type: none"> • V1: Aufwand Schutzmaßnahmen durch Verbau groß • V2: Aufwand Schutzmaßnahmen durch Verbau klein • V3: Einhausung (Galerien) der Verkehrsinfrastruktur • V4: Konventioneller Tunnel Verkehrsinfrastruktur

Abbildung 119: Übersicht Konzept für die Bekämpfung von Naturgefahren am Beispiel eines Lawinengangs mit konkreter Vorgehensweise und Szenarioanalyse als Basis für die SWOT - Beurteilung

6.2 Auswahl Einsatzgebiet

6.2.1 Ziel der Auswahl

Es sollten zwei Naturgefahren erfasst werden, wobei sowohl eine Rutschung, als auch eine Lawine berücksichtigt sein sollte. Zusätzlich sollten Sensoren ausgebracht und eine Sprengung einer Lawine durchgeführt werden. Der Fokus liegt bei der Skalierbarkeit der Anwendungen und dem Nutzen für die Auftraggeber (AG), da großes Potenzial in der Erfassung von Naturgefahren durch mobile Sensorik erwartet wird. Mithilfe der Fachexperten der AG wurden in Brainstorming-Workshops und einer Befragung die Potenziale im Teilbereich Naturgefahren zusammengestellt und konkrete Anwendungen definiert.

6.2.2 Brainstorming-Workshops

Die Workshops wurden genutzt, um die Ideen und Möglichkeiten abzugleichen und konkrete Teststellungen mit entsprechender Skalierbarkeit und Forschungscharakter zu definieren. In einer Reihe von Workshops und Besprechungen (20.11.2017, 13.04.2018, 24.5.2018, 05.12.2018, 23.11.2019, 15.05.2019 und 26.06.2019) wurden dazu die möglichen Anwendungsfälle, die Auswahl der Anlagen und Schutzgebiete konkretisiert bzw. die vorliegenden Ansätze und Zwischenergebnisse diskutiert. Nachfolgend eine kurze Zusammenfassung der Erkenntnisse der Brainstorming-Workshops:

Schneezustandserfassung:

- Recherche und Tests Abwurfsensoren mit Bluetooth Verbindung zur Ermittlung von Schneedichte, Wassergehalt und Temperatur etc.
- Bestimmung der Schneemenge für Ermittlung einer potenziellen Gefahr für die Strecke (über Oberflächenmodell)
- Sensoren an der Oberfläche nur für Gleitschneelawinen interessant, Schichtenaufbau nur in unterschiedlichen Tiefen erfassbar
- Einsatz einer Sonde zur Erfassung der unteren Schneeschichten wird weiter geprüft
- Rückrechnung Aufbau Schneedecke und Gefährdung über statistische Modelle

Lawinensprengung:

- Rechtliche und technische Aspekte mit Sprengmeister abklären
- Bedenken seitens ASFINAG bezüglich mit Sprengstoff-bestückten UAV
- Siedlungszonen und Witterungsverhältnisse berücksichtigen
- Einsatzmöglichkeiten UAV bei Schlechtwetter (Sicht)
- Dokumentation Sprengwirkung nach abgegangener Lawine – Durchführung muss wegen starken Reflexionen an der Schneeoberfläche geprüft/recherchiert werden
- Planung und praktische Durchführung Lawinensprengung
- Dokumentation und Erkenntnisgewinn für regelmäßigen Einsatz
- SWOT-Analyse und LCC zum Vergleich mit passiven und aktiven Schutzmaßnahmen

Muren und Rutschhänge:

- Methoden zur Erfassung von Bewegungen: Vergleich digitaler Oberflächenmodelle, punktueller Einsatz von Reflektoren, Bilderkennung
- Problematik: Auffinden fixer Referenzpunkte
- Dokumentation vor und nach einem Ereignis interessant
- Möglichkeiten für die Erfassung von Feuchte, Materialzusammensetzung und Geschwindigkeit sind zu prüfen
- Erfassung der Geschwindigkeit könnte über den Abwurf von GPS-Empfängern erfolgen

- ASFINAG und BLADESCAPE bringen Ergebnisse der Schüttmure aus dem Ready2Fly-Projekt in RISKMON ein
- Prüfung von Einsatzmöglichkeiten der Drohne als Hilfsmittel oder zentrales Element

Im Rahmen der Termine wurden unter anderem Ansprechpartner für die jeweiligen Bauwerkskategorien festgelegt, die ihrerseits die interne Kommunikation mit den entsprechenden Experten übernehmen.

Tabelle 57: Ansprechpartner im Teilbereich Naturgefahren

Kategorie	ASFINAG	ÖBB
Lawinen	Klaus Gspan, Karl Engelke	Michael Brauner, Christine Schönberger
Rutschungen	Klaus Gspan, Karl Engelke	Michael Brauner, Christine Schönberger

6.2.3 Expertenbefragung

Ziel der Expertenbefragung ist das Abstimmen der tatsächlichen Anwendungen und definieren konkreter praktischer Teststellungen.

Tabelle 58 zeigt einen Ausschnitt des Ergebnisses der Expertenbefragung. In der Auswertung der Expertenbefragung wurden die genannten Objekte mit Punkten von 1 bis 5 bewertet. Die Wertung setzt sich aus der Anzahl der möglichen Anwendungen, die im Rahmen der Erfassung durchführbar wären, der forschungsbezogenen Relevanz und der Prioritäten der Fachexperten der AG zusammen.

Tabelle 58: Ausschnitt aus der Auswertung der Expertenumfrage im Teilbereich Naturgefahren

Beschreibung der Anwendung	Machbarkeit	Standardanwendung	R2F Durchführbarkeit	Kommentar	Skigebiet Ischgl	Wald am Schoberpass Felssturz
Eingereicht von					Brauner	Steinbrucker
Firma					ÖBB	ASFINAG
Typ					Schneezustand, Sprengung	Steinschüttmure
Wertung					5	5
Feuchtigkeit (Oberfläche)	ja	nein		„Abwurf“-sensor notwendig	ja	
Temperatur (Oberfläche)	ja	nein			ja	
Bewegung (Oberfläche)	ja	nein			ja	
Dichte (Oberfläche)	möglicherweise	nein			ja	
Schichtenstruktur (unter Oberfläche)	nein	nein			ja	
Feuchtigkeit (unter Oberfläche)	nein	nein		Einsatz von Sonden prüfen	ja	
Dichte (unter Oberfläche)	nein	nein		Einsatz von Sonden prüfen	ja	
Schnee freie Erfassung	ja	ja	ja		ja	

Erfassung aktueller Schneeoberfläche	ja	ja			ja	
punktueller Schneeprofilmessung	nein	nein			ja	
Volumen, Mengenprofil	ja	ja	ja		ja	
Bewegung, regelm. Geländeänderungen	ja	ja			ja	ja
Höhenschichtmodell	ja	ja	ja		ja	
Digitales Oberflächenmodell	ja	ja	ja		ja	ja
Vitalität des möglicherweise gegebenen Bewuchses	ja	ja			ja	
Abwurf der Sprengvorrichtung	ja	nein		Rechtliche Fragestellungen	ja	
Geschwindigkeit einer Rutschung	möglicherweise	nein		GPS Abwurfsensor notwendig	ja	ja
Materialzusammensetzung	nein	nein			ja	

6.2.4 Ergebnis und Beschluss

Im Rahmen des Steuerungsteammeetings vom 6.6.2018 wurden die in Tabelle 59 aufgelisteten praktischen Teststellungen beschlossen. Die Aufteilung entspricht dabei den Vorgaben aus dem Projektangebot.

Tabelle 59: Beschlossene Anwendungen im Bereich Naturgefahren

Kat.	Angebot	Teilbereich	Vorschlag	Objekttyp	Unternehmen
B	1.Naturgefahr	Naturgefahren	Wald am Schoberpass Felssturz	Steinschüttmure	ASFINAG
B	2.Naturgefahr	Naturgefahren	Skigebiet Ischgl	Schneezustandserfassung	ÖBB
B	1. Sensor-Ausbringung	Naturgefahren	Skigebiet Ischgl	Sensor-Ausbringung	ÖBB
B	1. Lawinensprengung	Naturgefahren	Skigebiet Ischgl	Lawinensprengung	ÖBB

6.2.5 Änderungen, Ergebnisse und Beschluss

Im Rahmen des Steuerungsteam-Meetings am 17.01.2019, sowie der telefonischen Abstimmung in KW 8, wurde auf Basis der Vorschläge aus der Projektarbeitsgruppe eine angepasste Struktur für die operativen Anwendungen wie folgt beschlossen

Tabelle 60: Angepasste Anwendungen im Bereich Naturgefahren

Kat.	Angebot	Teilbereich	Vorschlag	Objekttyp	Unternehmen
B	1.Naturgefahr	Naturgefahren	Imst in Tirol, Röhrengabenmure	Steinschüttmure	ASFINAG
B	2.Naturgefahr	Naturgefahren	Hochkar	Schneemächtigkeitserfassung	ÖBB
B	1. Sensor-Ausbringung	Naturgefahren	Hochkar	Schneeprofilmessung	ÖBB
B	1. Lawinensprengung	Naturgefahren	Südtirol, Passo de Tonale	Lawinensprengung	ÖBB, ASFINAG

6.3 Einsatzplanung und Sicherheitsvorkehrung

6.3.1 Steinschüttmure (ASFINAG)

Aufgrund der häufigen Veränderung (Nachrutschen von Gesteinsmaterial) wurde die Röhrengrabenmure in Imst als Erfassungsobjekt ausgewählt. Mit Erfassung eines Ausgangszustandes (Nullmessung) und einer Erfassung unmittelbar nach Veränderung (Vergleichsmessung) war es das Ziel ein Differenzmodell zu berechnen und Massenverschiebungen darzustellen.

Da für die Berechnung eines Differenzmodells die Oberflächenmodelle beider Befliegungen gleich georeferenziert sein müssen, wurden entsprechende Passpunkte eingemessen.

Für die Flugplanung zur Nullmessung wurden folgende Parameter vorgesehen:

- Flugparameter:
 - Raster 90° zu Falllinie der Schüttmure
 - Flughöhe:
 - § 90m AGL im Bereich der Hochspannungsleitung
 - § 45m AGL im mittleren Bereich der Schüttmure
 - § 60m AGL im oberen Bereich der Schüttmure
 - Überlappung: 85% / 70%
 - Fluggeschwindigkeit:
 - § 90m AGL: 3m/s
 - § 45m AGL: 1,5m/s
 - § 60m AGL: 2,2m/s
- Flugsteuerung:
 - Wegpunktflug

Die erste Datenerfassung erfolgte am 15.04.2019 mit einer Einsatzdauer von insgesamt rund 5 Stunden (inkl. Rüst- und Einmesszeiten) bei trockenen und sonnigen Witterungsverhältnissen.

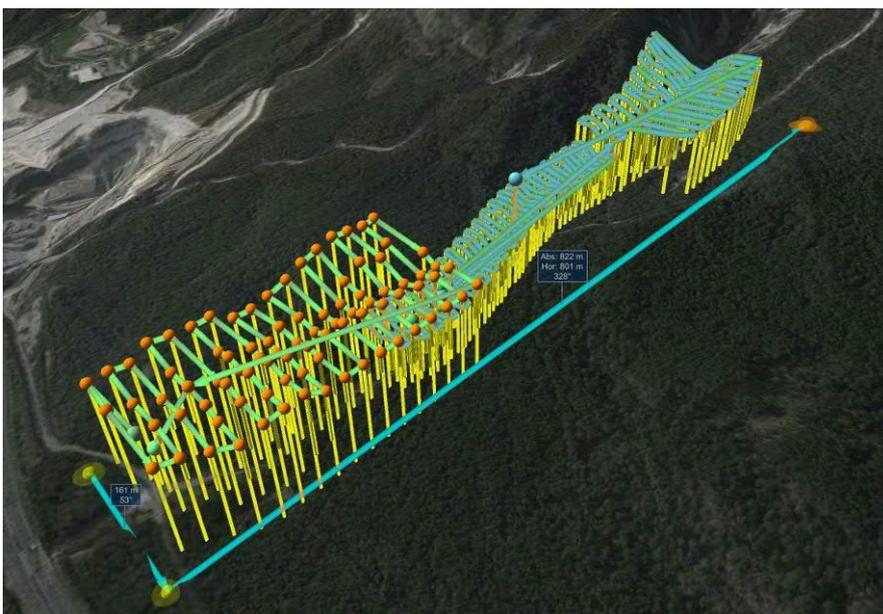


Abbildung 120: Planung Flugrouten Nullmessung

Im Gegensatz zur ersten Befliegung wurde für die zweite Erfassung eine optimierte Flugroute entlang der Längsachse der Mure umgesetzt. Auch wurde die Breite des zu erfassenden Streifens auf den für die Differenzmessung relevanten Bereich fokussiert.

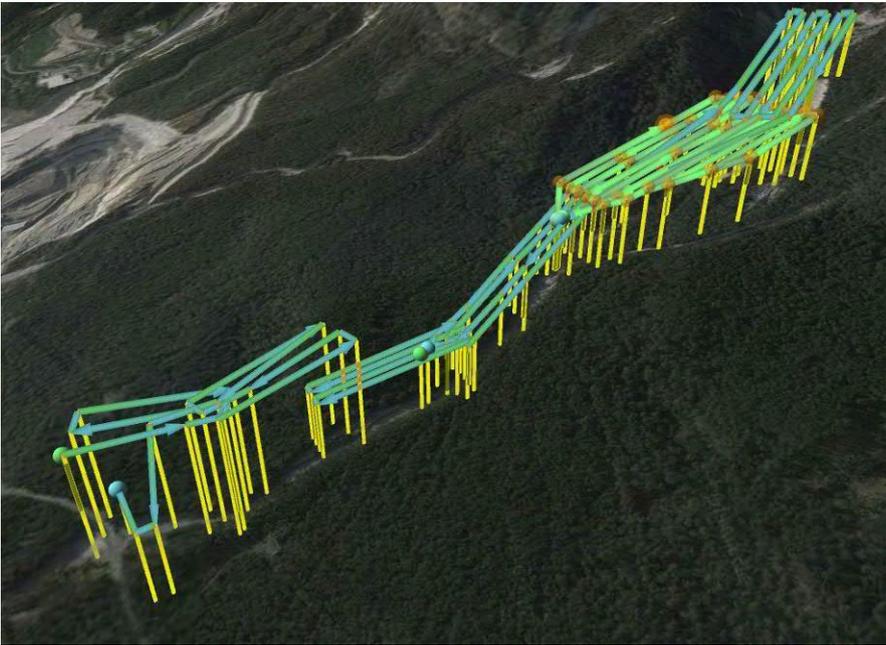


Abbildung 121: Planung Flugrouten Vergleichsmessung Schüttmure

Die zweite Datenerfassung erfolgte am 13.08.2019 mit einer Einsatzdauer von rund einer Stunde und musste regenbedingt abgebrochen werden. Die Fortsetzung erfolgte am 14.08.2019 mit einer Einsatzdauer von rund 2 Stunden bei trockenen und sonnigen Witterungsverhältnissen.



Abbildung 122: Impressionen vom Einsatz Schüttmure

6.3.2 Schneemächtigkeitserfassung Hochkar (ÖBB)

Der Ansatz beruht analog zur Schüttmure auf einer Nullmessung zu einer Zeit ohne Schneeauflage und einer Messung mit Schneeauflage um die Differenz und Menge auswerten zu können. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden im Erfassungsbereich zusätzlich stichprobenartig Messungen mit Lawinensonden durchgeführt, um entsprechende Referenzdaten zur Schneehöhe zu haben. Als Erfassungsgebiet wurde eine gut erreichbare Fläche im Skigebiet Hochkar ausgewählt.

Da für die Berechnung des Differenzmodell die Oberflächenmodelle beider Befliegungen gleich georeferenziert sein müssen, werden GCPs (Bodenpunkte) markiert und mittels PPK-GNSS vermessen. Um die möglichen Erfassungsmethoden vergleichen zu können wurden die Daten wie geplant mittels Laserscanning, aber auch mittels Fotogrammetrie aufgenommen.

- Flugparameter:
 - Raster bzw. Doppelraster
 - Flughöhe: 60m, 80m, 100m
 - Überlappung für die Fotogrammetrie:
 - § Raster: 85% / 75%
 - § Doppelraster: 88% / 70%
 - Fluggeschwindigkeit:
 - § 60m, 80m AGL: 3,1m/s
 - § 100m AGL: 5m/s
- Flugsteuerung:
 - Wegpunktflug

Die Datenerfassung erfolgte am 25.04.2019 mit einer Einsatzdauer von insgesamt rund 6 Stunden (inkl. Rüst- und Einmesszeiten) bei trockenen und sonnigen Witterungsverhältnissen.



Abbildung 123: Händische Kontrollmessung der Schneemächtigkeit mittels Messsonden

6.3.3 Schneezustandserfassung Hochkar und Sensorausbringung (ÖBB)

Ein Ansatz zur Schneeprofilmessung mittels Sonar-Messgeräts wurde in theoretischer Form seitens BOKU konzipiert und in der Praxis getestet. Das Messgerät wurde an einem Seil am UAV hängend, punktuell auf die Schneeoberfläche aufgesetzt um die Schneehöhe zu messen und um Aussagen über das Schneeprofil ableiten zu können. Zusätzlich wurden Referenzmessungen im Erfassungsgebiet per Hand durchgeführt. Noch ohne weitere Auswertungen konnte bereits vor Ort festgestellt werden, dass das eingesetzte Gerät bzw. die Messungen zu keinen validen Ergebnissen führen, weshalb die eingesetzte Technologie nicht weiterverfolgt wurde und stattdessen ein eigenes Sensornetzwerk konzipiert wurde (vgl. Kap. 6.6).



Abbildung 124: Impressionen zur Schneehöhenmessung am Hochkar u.a. mit Schneestangen

6.3.4 Lawinensprengung (ASFINAG/ÖBB)

Nach der Recherche zu den rechtlichen Rahmenbedingungen, sowie den organisatorischen und anwendungsspezifischen Vorgaben, wurde schrittweise die technische Umsetzbarkeit konzeptiv erarbeitet. Insbesondere die rechtlichen Vorgaben, bspw. aus dem Sprengmittelgesetz, galt es in der technischen Konzeption zu berücksichtigen.

Schlussendlich konnte eine Möglichkeit gefunden und technisch umgesetzt werden. Im Zuge weiterer Recherchen zum geeigneten Sprengstoff konnte ein Austausch und in weitere Folge eine Kooperation mit einem jungen italienischen Technologieunternehmen gefunden werden. Das italienische Unternehmen hatte einen ähnlichen Ansatz als Ergänzung für Ihr Portfolio und der intensive Ideentransfer führte zu einer technisch weit ausgereiften Lösung. Diese konnte im Rahmen einer von BLADESCAPE und dem italienischem Technologieunternehmen organisierten Produktveranstaltung in Südtirol am Passo del Tonale auch operativ getestet werden.

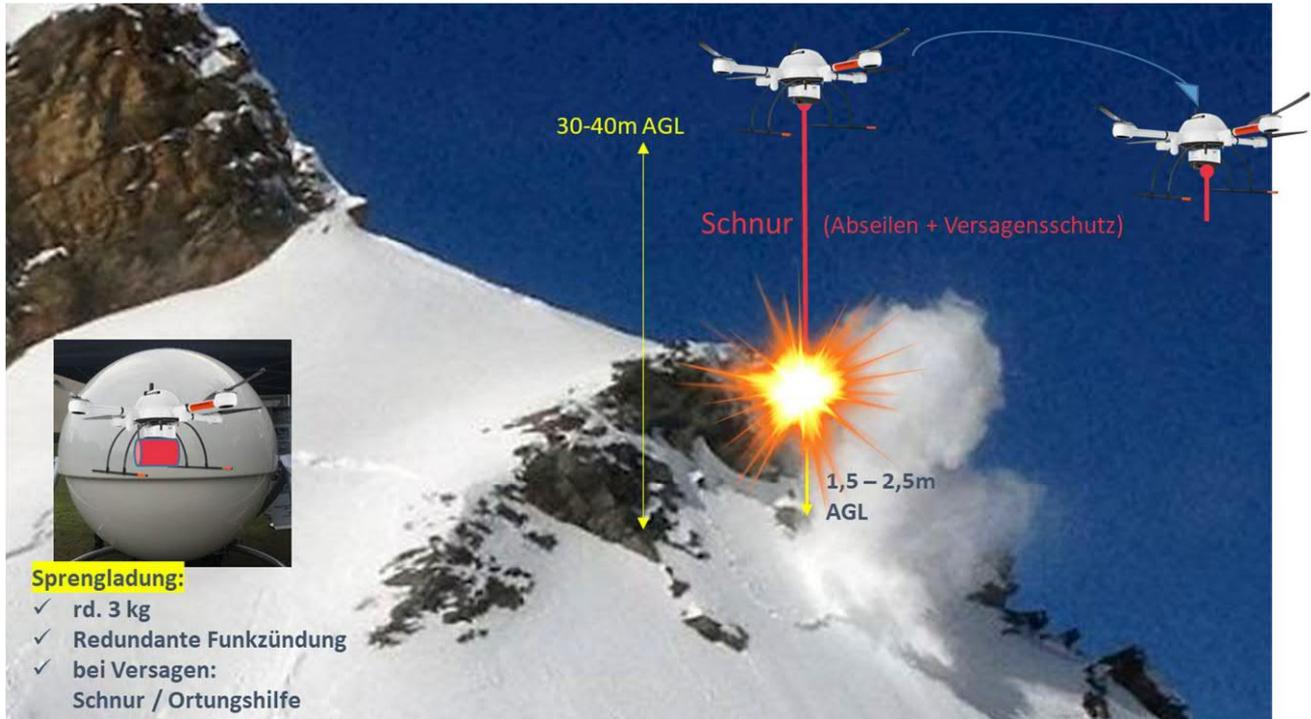


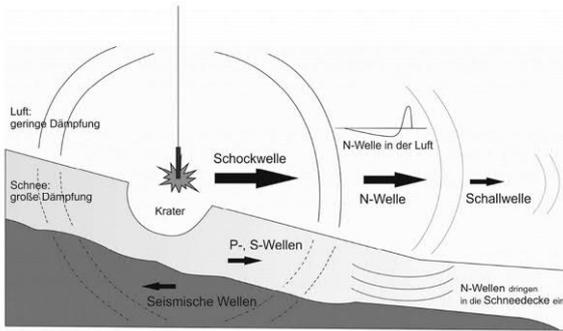
Abbildung 125: Übersichtsdarstellung zur Konzeption der technischen Ausführung zur Lawinensprengung

Die Teststellung wurde vom 02. -03.05.2019 bei sonnigen bzw. zum Teil bewölkten Witterungsverhältnissen erfolgreich durchgeführt. Zwischenzeitlich ist das Produkt für den operativen Einsatz fertiggestellt und steht einem Einsatz in der Wintersaison 2019/20 aus technologischer Sicht nichts im Wege, die entsprechenden Genehmigungen für den Einsatz in Österreich sind noch vorzubereiten und einzuholen. Auf Basis von Erfahrungswerten über den Zeitraum einer Wintersaison wird empfohlen ein generelles umfassendes Einsatzkonzept abzuleiten.

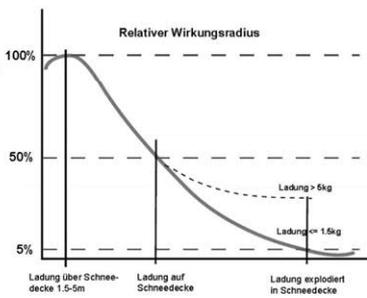


Abbildung 126: Impressionen der Teststellung Lawinensprengung

Lawinensprengung: Wellenfortpflanzung einer Detonation



Lawinensprengung:
Zusammenhang
Wirkradius und Lage



vgl. GUBLER, H. et al. (2011);
BRUCKER, A. (2013) sowie
BUCHINGER, S. (2014)

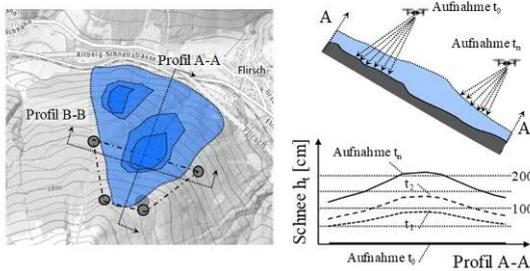
Lawinensprengung: Wirkradius, Gewicht und Sprenghöhe

	Sprengpunkthöhe [m]	Ladungsgröße [kg]	Radius Anbruchssicherheit [m]	Radius Begehungssicherheit [m]
Überschnee-sprengung	+3 bis +3,5	4 bis 5	120 bis 130	70
	+2 bis +2,5	1,5 bis 2,5	80 bis 90	50
	+1	4 bis 5	80 bis 90	50
Oberflä-chen-spr.	+1	1,5 bis 2,5	60 bis 70	35 bis 40
	0	4 bis 5	50 bis 60	30 bis 35
Sprengung im Schnee	0	1,5 bis 2,5	35 bis 40	20 bis 25
	-0,2	4 bis 5	40	25
	-0,2	1,5 bis 2,5	25	15
Garex	-0,7	1,5 bis 5	10	5 bis 10
	vorwärts	3 m³	70 bis 120	35 bis 85
	45° seitwärts	3 m³	80 bis 100	25 bis 70
	vorwärts	1,5 m³	50 bis 100	25 bis 70

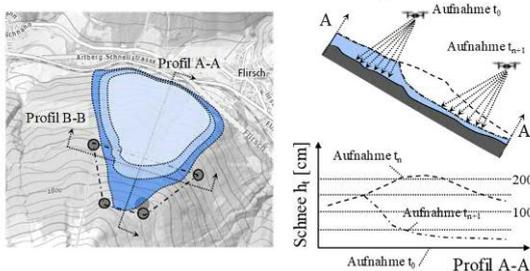
- Der Wirkradius hängt von Sprengpunkthöhe, Ladungsgröße und Sprengstofftyp ab – ideal sind z.B. 2-2,5 m Höhe bei 1,5-2,5 kg
- Sprengung von Nassschneelawinen möglichst am Nachmittag, mit großer Ladung über Schneoberfläche
- Für die Optimierung sind Ladungsgröße, Eingriffsort, Zeitpunkt, Art, Kosten und Zuverlässigkeit der Methode maßgebend

Abbildung 127: Grundlagen der Lawinensprengung mit Wirkradius, Gewicht und Sprenghöhe

Schneedecken durch Differenzaufnahme (Abschnitt)

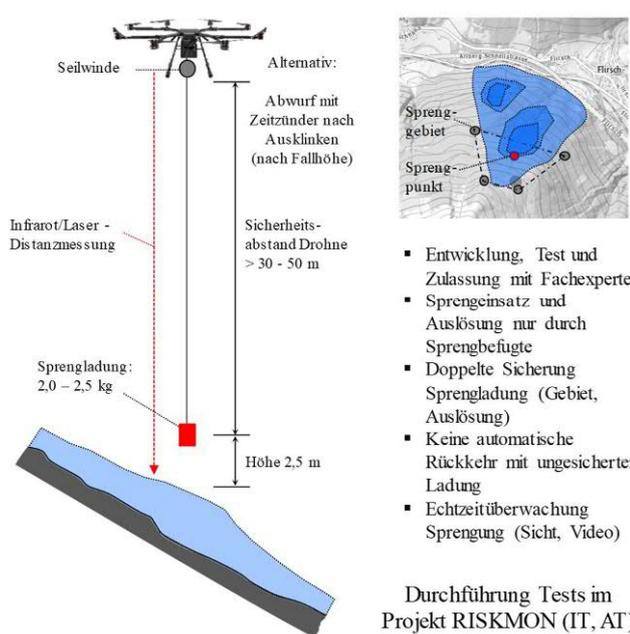


Schneedecken durch Differenzaufnahme (Abschnitt)



Quelle: HOFFMANN, M. (2018)

Konzept: Lawinensprengung mittels Drohnen



- Entwicklung, Test und Zulassung mit Fachexperten
- Sprenginsatz und Auslösung nur durch Sprengbefugte
- Doppelte Sicherung Sprengladung (Gebiet, Auslösung)
- Keine automatische Rückkehr mit ungesicherter Ladung
- Echtzeitüberwachung Sprengung (Sicht, Video)

Durchführung Tests im Projekt RISKMON (IT, AT)

Abbildung 128: Einsatzkonzept und Erfassung von Lawinensprengungen mittels UAV

6.4 Datenauswertung UAS

6.4.1 Schüttmure IMST (ASFINAG)

Generell entstehen Muren im Gebirge bzw. steilem Gelände bei einer Wasserübersättigung bzw. Herabsetzung der Kohäsion infolge langanhaltender Niederschläge bzw. der Schneeschmelze in Rinnen oder Gräben. Eine Schüttmure (auch Mure oder Rufe genannt) ist ein breiartiges, oft schnell fließendes Gemenge aus Wasser und Feststoffen (Sand, Kies, Steine, Blöcke, Holz) mit einem hohen Feststoffanteil von circa 30 bis 60 %. Im Gebirge treten sie insbesondere in sehr steilen Wildbachgerinnen mit einer Neigung von mindestens 25 bis 30 % auf. Sie können große Gerölmengen mit sich führen und einen erheblichen Schaden an Verkehrswegen und Siedlungen anrichten. Die systematische Erfassung von Muren und Abgangsereignissen kann dabei helfen Gefahrenlagen einzuschätzen und entsprechende Maßnahmen (technisch, biologisch, organisatorisch, raumplanerisch) zu setzen. Während und nach Ereignissen kann eine Erfassung mittels UAS bei der Aufklärung bezüglich weiterer drohender Gefahren sowie der Abschätzung des Schadensausmaßes, der Quantifizierung von Veränderungen und notwendigen Aufräumarbeiten sowie der Verkehrsfreigabe dienen.⁴²

Das Ziel der Erfassung von Naturgefahren in RISKMON war eine Potenzialanalyse sowie Skalierbarkeit von Anwendung und Nutzen in der Erfassung von Schüttmuren vor, während und nach Ereignissen mittels UAS und mobiler Sensorik. Aufbauend auf die Vorbereitungen und Workshops von RISKMON wurde mit den Experten von ÖBB und ASFINAG eine Schüttmure bei IMST an der A12 – Inntalautobahn ausgewählt (Röhrengabenmure). Wesentliches Auswahlkriterium war die unmittelbare Nähe zur A12 sowie eine hohe Wahrscheinlichkeit von Ereignissen bzw. einem Murenabgang im Projektzeitraum. Die Röhrengabenmure liegt zwischen dem Industriegebiet Tschirgant und der Auffahrt der B186 Ötztal Bundesstraße auf die A2 und verläuft von Norden nach Süden in Richtung Inn unter der A12 (Abbildung 129).



Abbildung 129: N1 Schüttmure Imst – Übersicht Projektgebiet und 3D – Ansicht

⁴² vgl. ROMANG, H. et al. (2009)

Wie in der Einsatzplanung beschrieben, erfolgte die Befliegung der Schüttmure vor einem Murenabgang (t_0) bzw. unmittelbar danach (t_1) im Jahr 2019. Wie Abbildung 130 zeigt, erfolgte die Erfassung jeweils mittels Fotogrammetrie in einem S-förmigen Flugpfad mit hoher Auflösung (42 MP) und Überlappung (80%). Dementsprechend war eine 3D - Rekonstruktion der Schüttmure als 3D – Pointcloud (Abbildung 131) sowie 3D Mesh (Abbildung 132) möglich. Wie die Ausschnitte der Orthofotos zeigen, konnte eine Bodenauflösung im Zentimeterbereich erreicht werden (Abbildung 133), was eine ausgezeichnete Basis für Differenzanalysen darstellt (Abbildung 134). Weiters können auf dieser Basis weitgehend automatisiert Querprofile und Massenanalysen für Risikoabschätzung, Maßnahmenplanung und Optimierung durchgeführt werden (Abbildung 135). Dementsprechend zeigen die Ergebnisse von RISKMON, die unmittelbare Anwendbarkeit von Erfassung und Aufklärung von Schüttmuren mittels leistungsfähiger UAS und Sensorik.

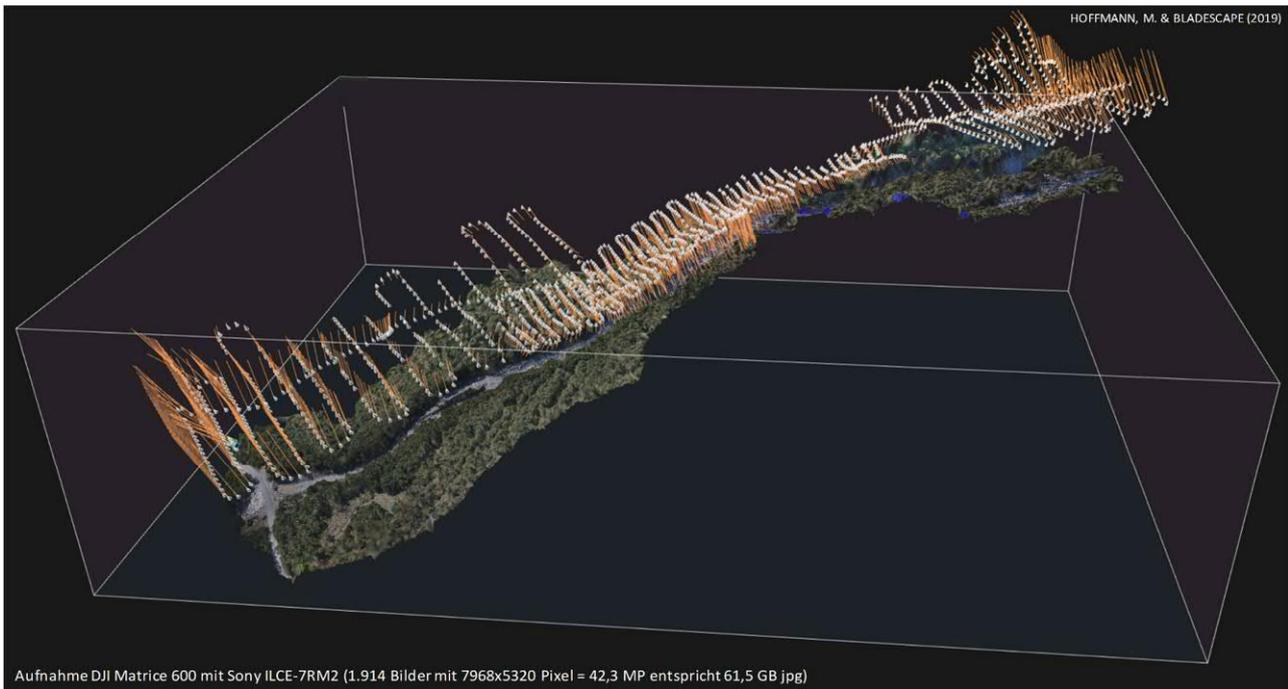


Abbildung 130: N1 Schüttmure Imst – Flugpfad und 3D – Ansicht zu t_0

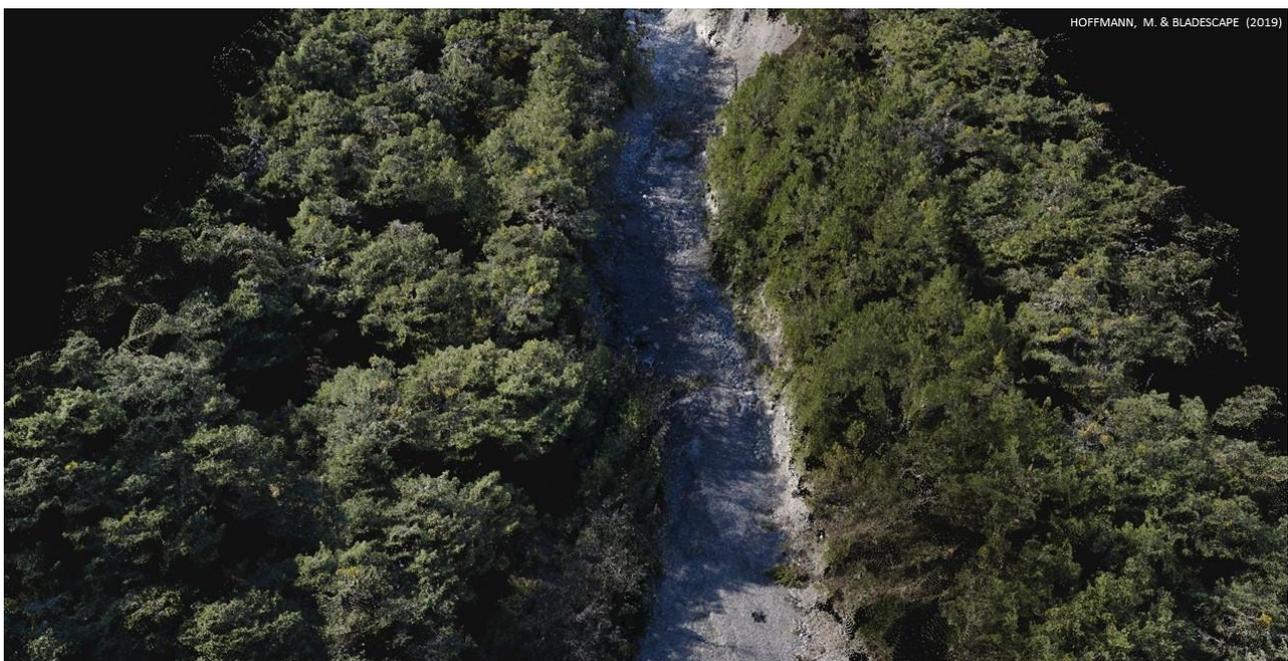


Abbildung 131: N1 Schüttmure Imst - 3D Rekonstruktion zu t_0 mit Ausschnitt 3D - Pointcloud



Abbildung 132: N1 Schüttmure Imst - 3D Rekonstruktion zu t_0 mit Ausschnitt 3D – Mesh texturiert



Abbildung 133: N1 Schüttmure Imst - 3D Rekonstruktion zu t_0 & t_1 mit Ausschnitten Orthofotos (Detail)

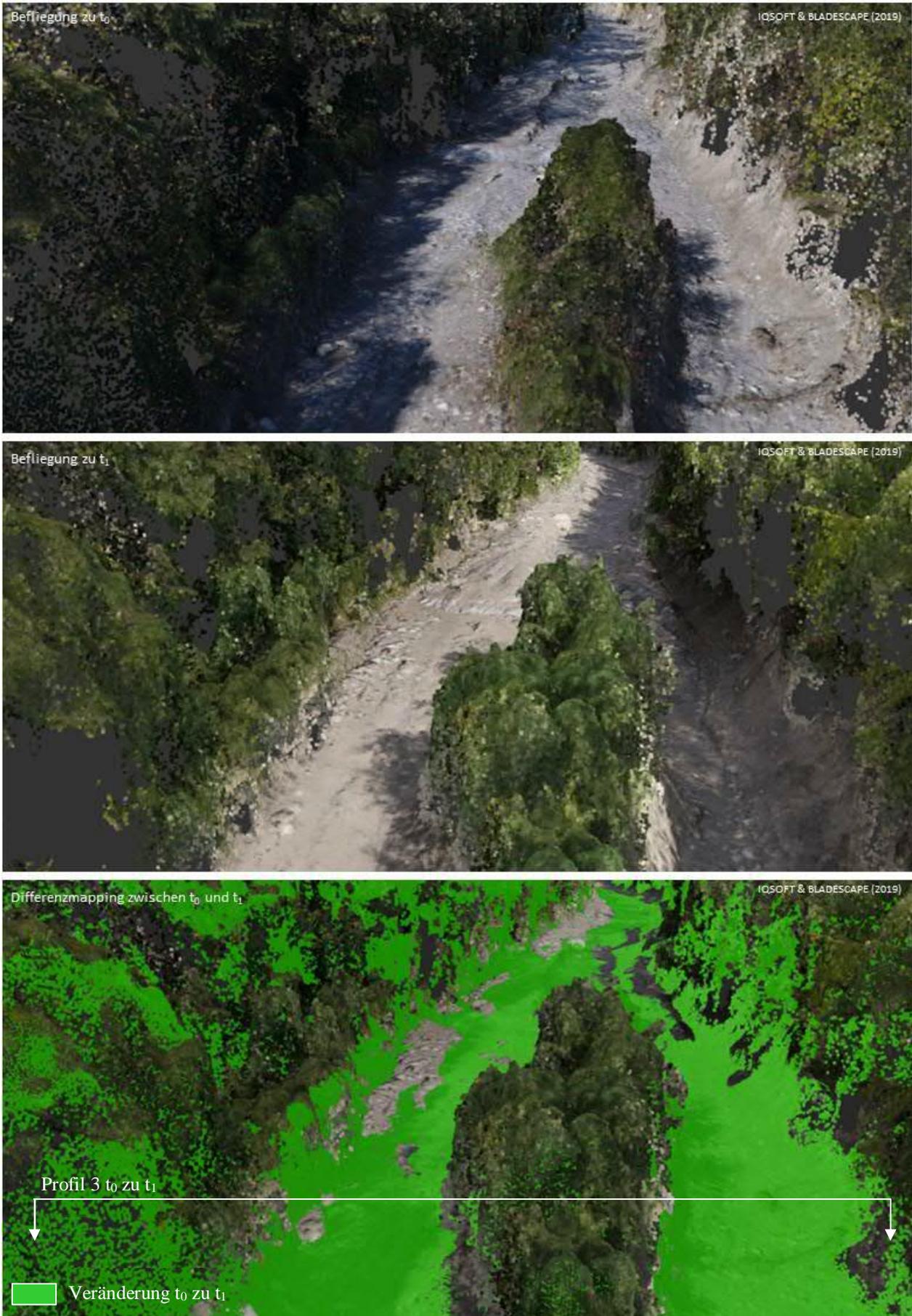
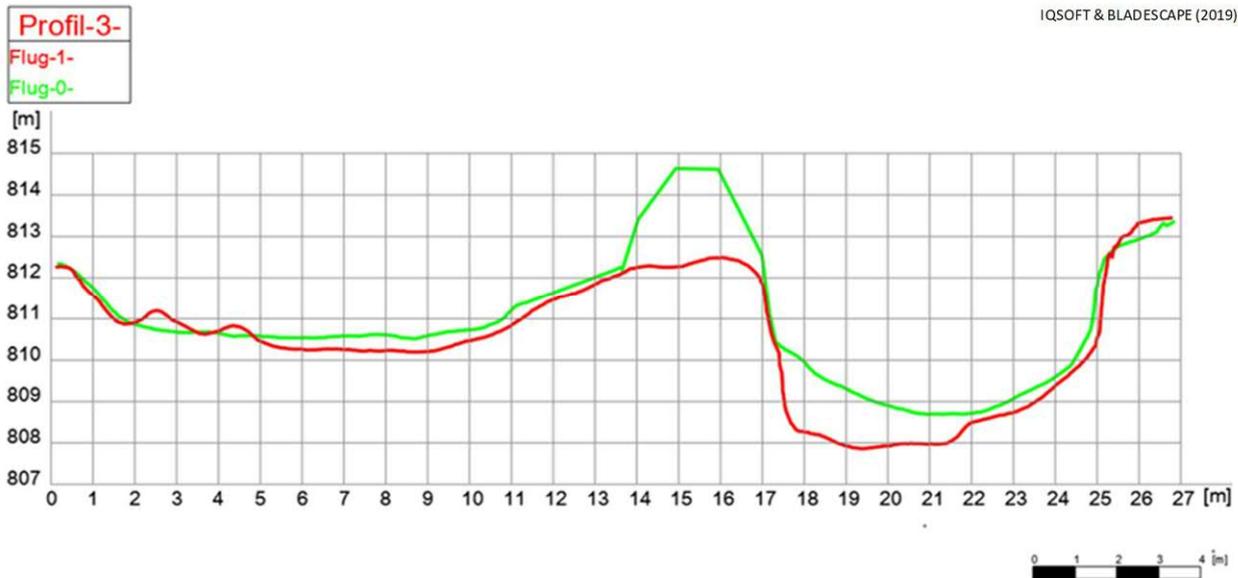


Abbildung 134: N1 Schüttmure Imst - 3D Rekonstruktion mit Differenz von t_0 zu t_1 (Pointcloud)



IQSOFT & BLADESCAPE (2019)

Abbildung 135: N1 Schüttmure Imst - Differenzprofil von t_0 zu t_1 (Schnitt auf Basis Pointcloud)

6.4.2 Schneezustandserfassung Hochkar

Die Schneezustandserfassung bzw. die Ermittlung der Schneemengen in einem Anbruchgebiet ist von zentraler Bedeutung für die Einschätzung von Lawinengefahren. Die Beurteilung kann sowohl empirisch durch Einschätzung (Kap. 2.2.2), durch Stichproben sowie rechnerisch auf Basis von Aufzeichnungen (Kap. 6.5.2) erfolgen. Wie anhand des in RISKMON entwickelten Lebenszykluskostenmodells gezeigt werden kann, ist zudem eine präventive Vermeidung von Lawinengefahren mittels UAS möglich. Bei Kenntnis der kritischen Schneehöhen und Berechnung der Auswirkungen der jeweiligen Lawinenereignisse ist eine Kenntnis des genauen Aufbaus der Schneedecke nicht unbedingt erforderlich. Vielmehr kann eine Befliegung mittels UAS und Differenzanalyse zeigen, ob eine definierte Schneehöhe (Threshold) überschritten wurde und zeitnahe präventive Sprengungen an der optimalen Stelle durchführen.

Die Zielsetzung der Schneezustandserfassung am Hochkar war die Untersuchung der Möglichkeiten einer Ermittlung von Schneedeckenaufbau bzw. Dicke mittels UAV und Fotogrammetrie bzw. Laserscans. Das Einsatzgebiet wurde dabei in erster Linie aufgrund der guten Zugänglichkeit sowie der Möglichkeit von gefahrlosen Kontrollmessungen gewählt. Wesentliche Zielsetzung dabei war eine Erfassung mit bzw. ohne Schneedecke mit einer Auswertung der Differenzen sowie einer stichprobenartigen Kontrolle mittels Einzelmessungen. Abbildung 136 zeigt eine Übersichtskarte und 3D – Ansicht des Untersuchungsgebiets in der Nähe der Kar Hütte. Für eine möglichst genaue Erfassung der reflektierenden Schneedecke mittels UAS wurde ein Flugpfad in Form eines Gitters (2 x S-förmiger Flugpfad um 90° gedreht) zur optimalen Rekonstruktion gewählt. Der Flugpfad und das Ergebnis der fotogrammetrischen Rekonstruktion zu t_0 (mit Schnee) ist in Abbildung 137 dargestellt.

In weiterer Folge lassen sich aus den UAS-Aufnahmen bzw. den 3D – Modellen (Pointcloud, 3D-Mesh bzw. 3D-Mesh texturiert) hochgenaue Orthofotos, 2,5D – Höhenmodelle, Schnitte und Geländemodelle weitgehend automatisiert extrahieren (Abbildung 138). Die Ergebnisse können dann in den üblichen Standardformaten gespeichert bzw. zur Weiterverarbeitung in alle gängigen CAD und GIS – Systeme exportiert werden (Kap. 3.7). Die Prozessierung von Höhendifferenzen kann entweder direkt nach der Rekonstruktion durch Überlagerung der Punktwolken bzw. der Meshes oder der TIN-Netze im CAD samt Volumenberechnung erfolgen. Die konkrete Umsetzung mit Auswertung der

Schneedeckendicke in RISKMON aus der Erfassung zu t_0 und t_1 samt Schnitten S01 bis S04 findet sich in Abbildung 139 Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse von RISKMON die unmittelbare Anwendbarkeit für Aufklärung und Schneedeckenerfassung mittels leistungsfähiger UAS und Sensorik. Wesentlich für eine praktische Ausrollung ist ein Geländemodell bzw. entsprechende Erfassungen aller relevanten Streckenabschnitte und Lawinhänge. Die konkrete Durchführung von Lawensprengungen mittels UAS (Kap. 6.4.3) bzw. das Feststellen von kritischer Schneehöhen und Gefahrenlagen sowie der rechtzeitige Eingriff (Kap. 6.5) ist gemäß den Erkenntnissen in RISKMON gut umsetzbar und wird ergänzend auf Basis des entwickelten quantitativen Risiko- und Lebenszykluskostenmodells in den Folgekapiteln behandelt.



Abbildung 136: Schneeprofil Hochkar – Übersichtskarte und 3D - Ansicht

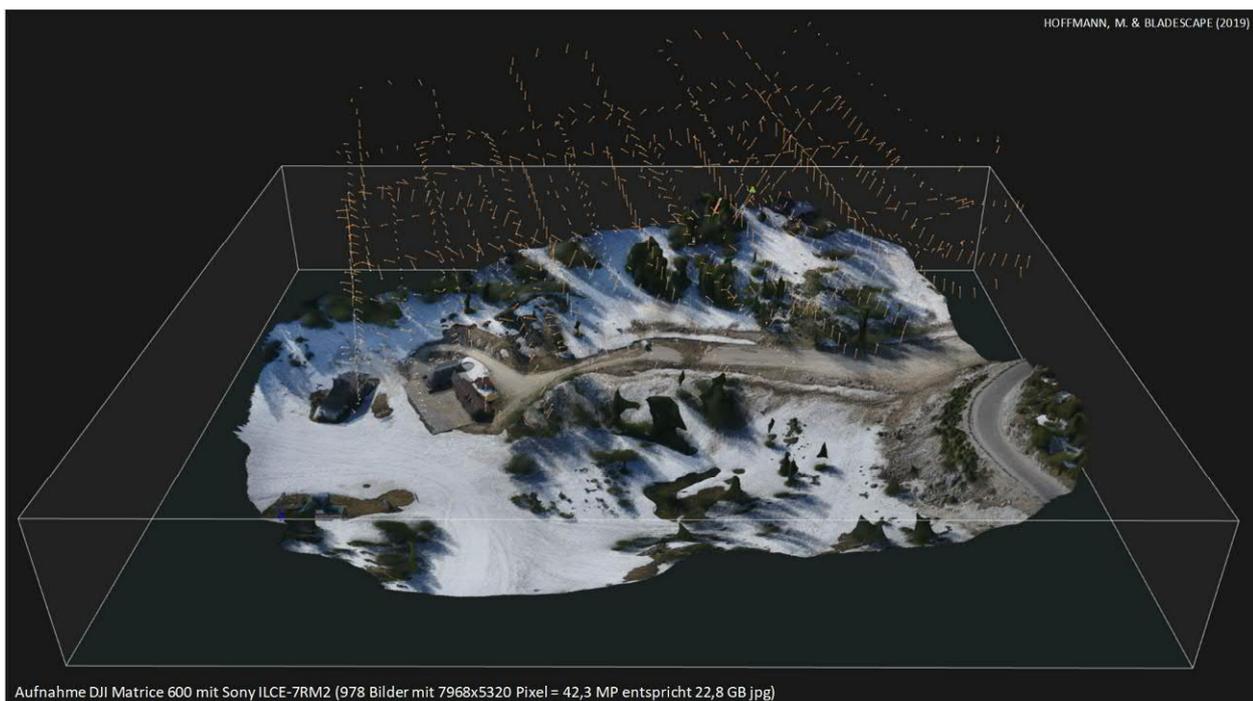
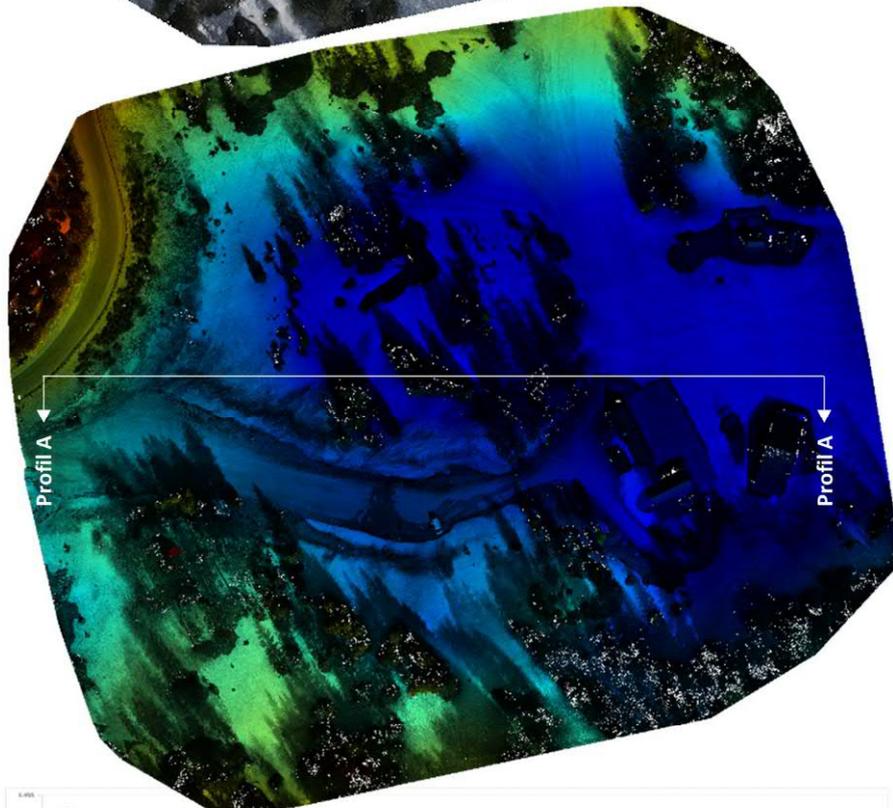
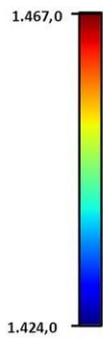


Abbildung 137: Schneeprofil Hochkar – Flugpfad und 3D – Ansicht Schneefeld zu t_0

Orthofoto Hochkar zu t_0
HOFFMANN, M. & BLADESCAPE (2019)



2,5D Orthofoto Hochkar 2,5D zu t_0
HOFFMANN, M. & BLADESCAPE (2019)



Höhenprofil A-A Hochkar zu t_0
HOFFMANN, M. & BLADESCAPE (2019)

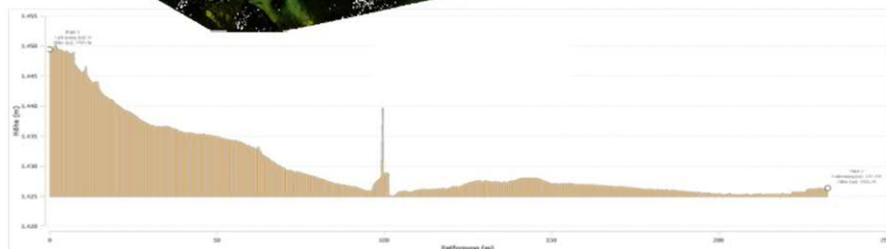


Abbildung 138: Schneeprofil Hochkar – Orthofoto, 2,5D Orthofoto (Farbe) und Höhenprofil zu t_0

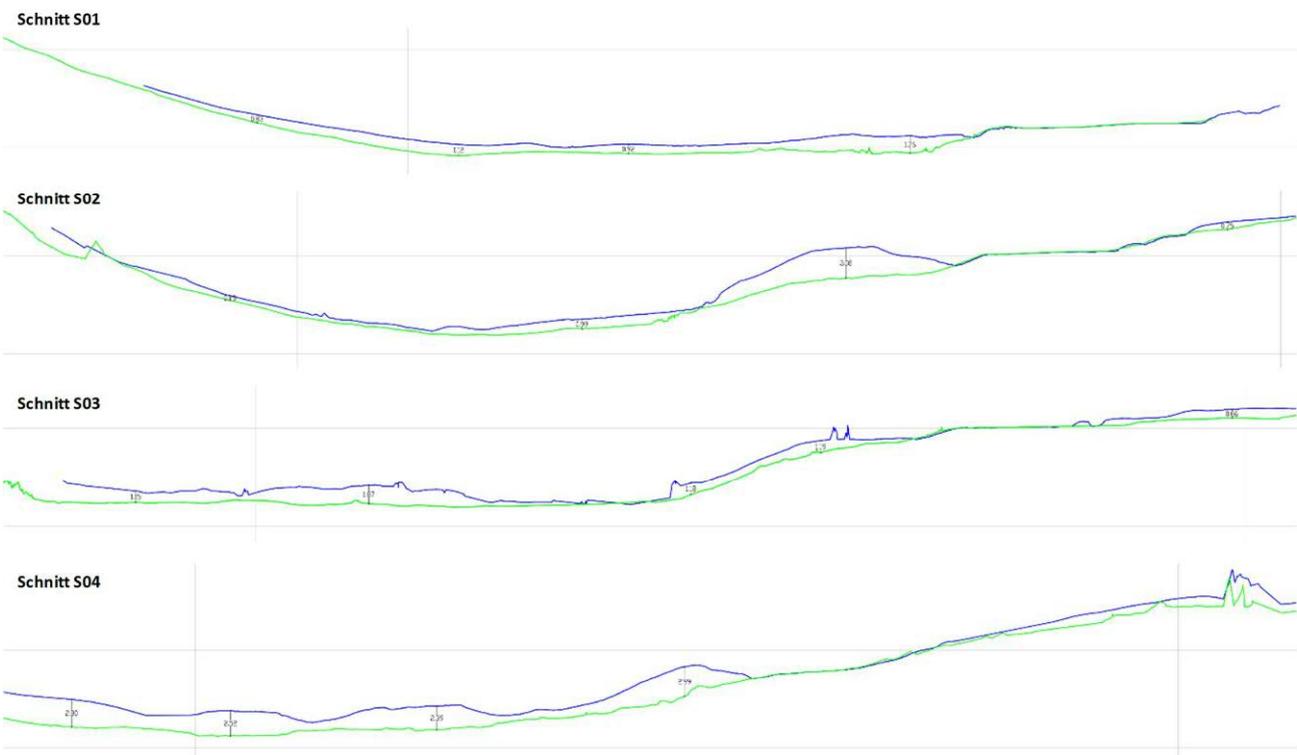
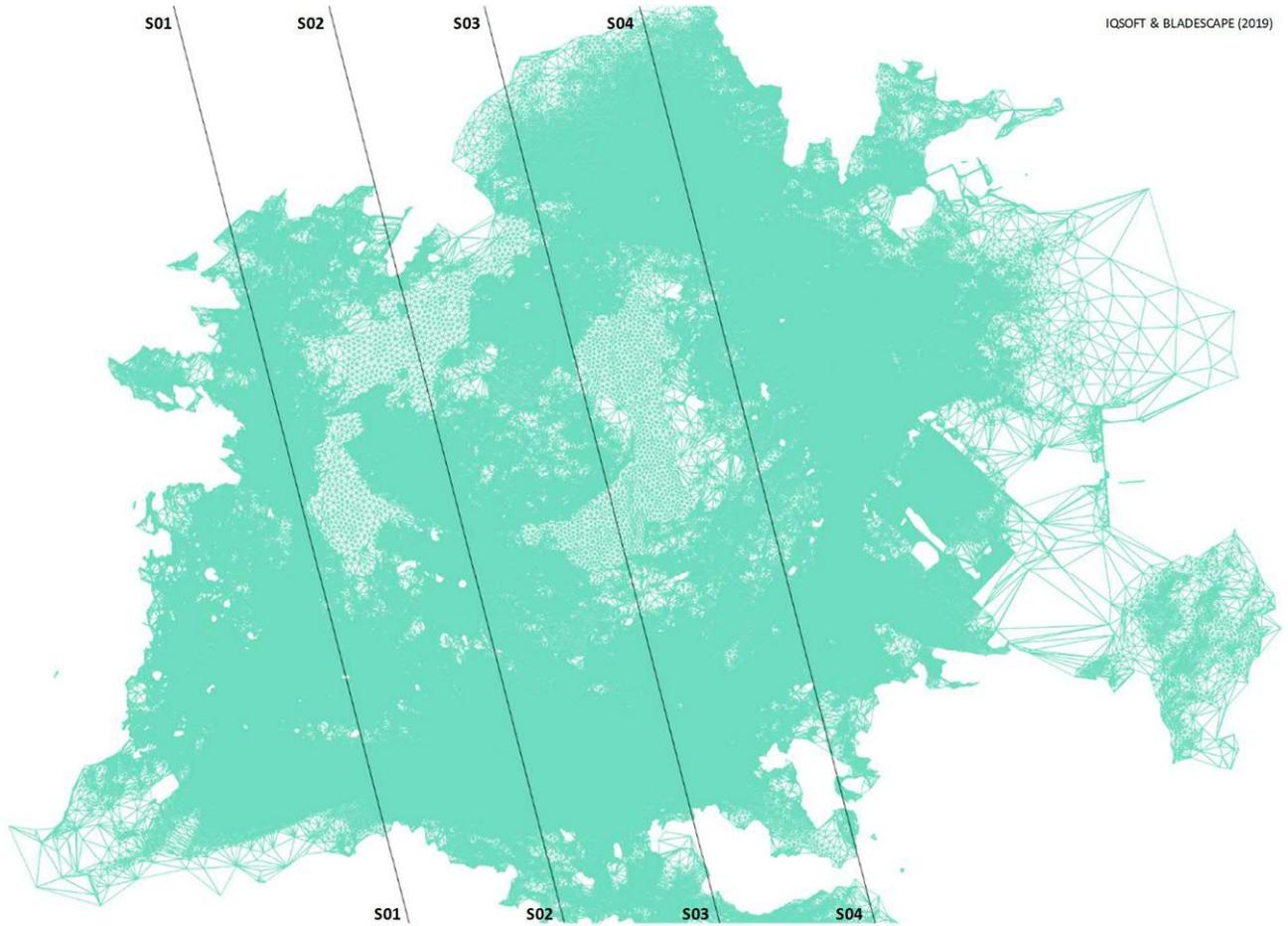


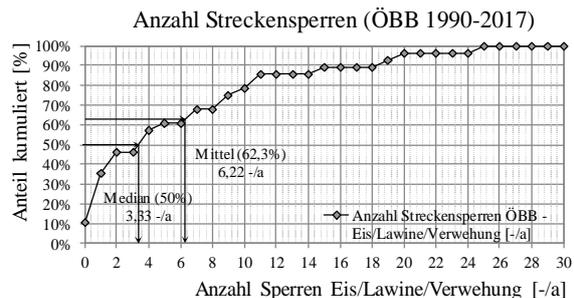
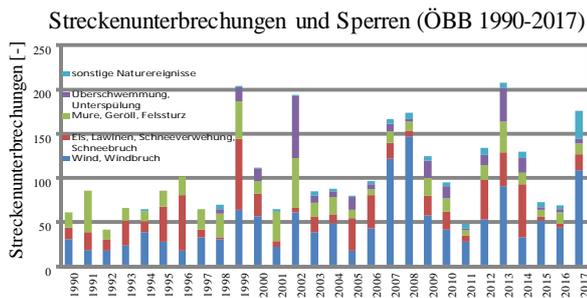
Abbildung 139: Schneeprofil Hochkar – TIN-Netz und Schneeprofile Differenz Erfassungen t_0 und t_1

6.5 Schneefallereignisse, Simulationsmodell und LCC -Analyse

6.5.1 Streckensperren, Ausfälle und Kosten

Wie in 2.2.2 angeführt, können die Infrastrukturbetreiber ÖBB und ASFINAG bei festgestellten bestehenden oder drohenden Naturgefahren für Anlagen und Nutzer Streckensperren verordnen. Die Anzahl der erforderlichen Streckensperren ist grundsätzlich von der Exposition der Streckenabschnitte, der Sicherung durch passive Schutzmaßnahmen und dem jeweiligen Ereignis abhängig (Unwetter, Niederschlag, Schneelage). Aufgrund der historischen Streckenführung und der Entwicklung von Ausbaumaßnahmen weisen die Streckenabschnitte der ÖBB im Vergleich zur ASFINAG eine höhere Exposition gegenüber Naturgefahren auf. Weiters sind Landesstraßen und Nebenstrecken in der Regel weniger gesichert und weisen deshalb eine höhere verbleibende Restexposition auf. Dementsprechend ist zu erwarten, dass Streckensperren infolge von Naturgefahren in Summe häufiger an Landesstraßen bzw. Nebenstrecken in exponierter Lage auftreten.

Die von den ÖBB übermittelten Daten erlauben eine Auswertung der Anzahl, Ursachen und Dauer von der Streckenunterbrechungen. Wie in Abbildung 140 dargestellt kommt es am Netz der ÖBB zu etwa 80-100 Streckenunterbrechungen kurzer oder längerer Dauer pro Jahr bei teilweise erheblichen jährlichen Schwankungen infolge von Extremereignissen. Die wesentlichsten Ursachen sind Wind/Windbruch, Eis/Lawinen/Verwehungen, Muren/Geröll/Felsstürze, Überschwemmung/Unterspülung sowie sonstige Naturereignisse. Die Anzahl der Streckenunterbrechungen bzw. Sperren infolge Eis/Schnee/Lawinen am Netz schwankt ebenfalls stark und liegt bei durchschnittlich 6,2/Jahr (Median = 3,33/Jahr). Diese Streckenunterbrechungen können präventiv (z.B. für Sprengungen, Abwarten) sowie infolge von tatsächlichen Ereignissen ohne/mit Schadensfolge eintreten. Rund 60% dieser Streckenunterbrechungen sind von relativ kurzer Dauer (<10 h), aufgrund einzelner gravierender Ereignisse liegt der Schnitt je Ereignis bei 41h/Ereignis bzw. im langjährigen Schnitt bei rund 215 h/Jahr. Eine vergleichbare Auswertung für das Netz der Autobahnen und Schnellstraßen wäre mit den Daten der Ereignisdatenbank der ASFINAG möglich, diese waren aber zum Zeitpunkt der Analyse nicht verfügbar.



- § Infolge von Naturgefahren kommt es am Netz der ÖBB zu etwa 100 Streckenunterbrechungen kürzerer oder längerer Dauer pro Jahr
- § Die Anzahl der Streckenunterbrechungen bzw. Sperren infolge Eis/Schnee/Lawinen am Netz schwankt und liegt bei $\bar{\varnothing}$ 6,2/Jahr
- § Der Großteil dieser Streckenunterbrechungen dauert vergleichsweise kurz (60% unter 10 Stunden)
- § Aufgrund einzelner längerer Streckenunterbrechungen liegt die $\bar{\varnothing}$ Dauer 41h/Sperre bzw. die gesamte Sperrdauer bei $\bar{\varnothing}$ 215 h/Jahr
- § Die mittleren Ausfallkosten am Netz der ÖBB im alpinen Raum können auf Basis der Betriebserschwerniskosten abgeschätzt werden

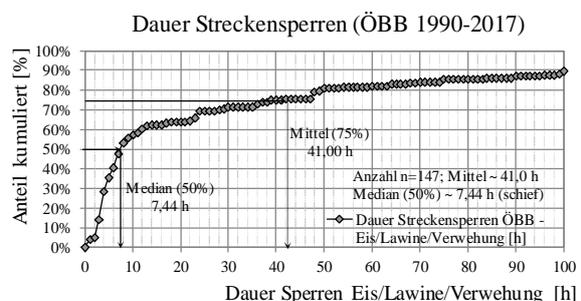


Abbildung 140: Auswertung der Streckenunterbrechungen und Streckensperren durch Naturgefahren mit Anzahl und Dauer der Sperren infolge Eis/Lawinen/Verwehungen von 1990 – 2017 am Netz der ÖBB

Für die Bewertung von Streckenunterbrechungen infolge Naturgefahren sind neben der Eintrittswahrscheinlichkeit u.a. Streckenauslastung, unmittelbare Ausfallkosten, Schadenskosten (Personen, Infrastruktur etc.) wesentlich. Die Auswertung der räumlichen Verteilung von Streckenunterbrechungen der ÖBB infolge von Schnee/Eis/Lawinen in Abbildung 141 zeigt, dass wie erwartet hauptsächlich Nebenstrecken mit geringer Verkehrsbelastung betroffen sind. Dementsprechend sind die Ausfallkosten für Betreiber bestehend aus Betriebserschwerungskosten, Instandsetzungskosten sowie Verdienstentgang auf diese Strecken abzustimmen. Für eine umfassendere Bewertungen sind zudem die Auswirkungen auf Nutzer, Volkswirtschaft und Umwelt zu berücksichtigen.

Da die ÖBB sowohl Zahlen zu Streckenunterbrechungen als auch den Betriebserschwerungskosten und sonstigen Auswirkungen geliefert haben, kann auf dieser Basis eine beispielhafte Abschätzung der verbleibenden Folgekosten von Schnee/Eis/Lawinen auf diese erfolgen. Die Betriebserschwerungskosten der ÖBB enthalten Kosten infolge Zugverspätungen, Umleitungen (Mehrkilometer und Verspätungen), Zugsausfällen und Schienenersatzverkehren. Je nach Art von Streckentyp (eingleisig, zweigleisig, viergleisig), Störung (Teil-/Vollausfall, geplant/ungeplant), Streckenbelastung und Tageszeit nach Dauer der Sperren sind entsprechende Kostendaten verfügbar⁴³. Da Streckenunterbrechungen infolge von Schnee/Eis/Lawinen überwiegend an eingleisigen Nebenstrecken erfolgen, werden an dieser Stelle deren Kosten für die Abschätzung verwendet. Wie Abbildung 142 zeigt, steigen die Betriebserschwerungskosten geplanter Sperren mit Zunahme der Streckenbedeutung und Dauer der Sperren. Die Kosten ungeplanter Sperren sind naturgemäß höher und können durch einen Zuschlagsfaktor ebenfalls abhängig von der Dauer der Sperre berücksichtigt werden. Ausgehend von der mittleren Dauer der Sperren von Ø 215 h/Jahr/Netz auf meist eingleisigen Strecken sind die Gesamtkosten für Streckensperren infolge Schnee/Eis/Lawinen mit 0,3-0,5 Mio. €/Jahr überschaubar (ohne Entgleisung/Folgekosten). Einschließlich Folgekosten für Management, Schadensfolgen und Instandsetzung werden sich die Schadenskosten in Summe auf geschätzt ~1,0 Mio. €/Jahr erhöhen.

**Prognose Bahnfahrergäste je Werktag 2020 (VPÖ 2025+)
und Streckensperren Schnee/Eis/Lawinen 2013-2017**

Fahrgäste je Werktag



1cm = 50.000 Fahrgäste je Werktag

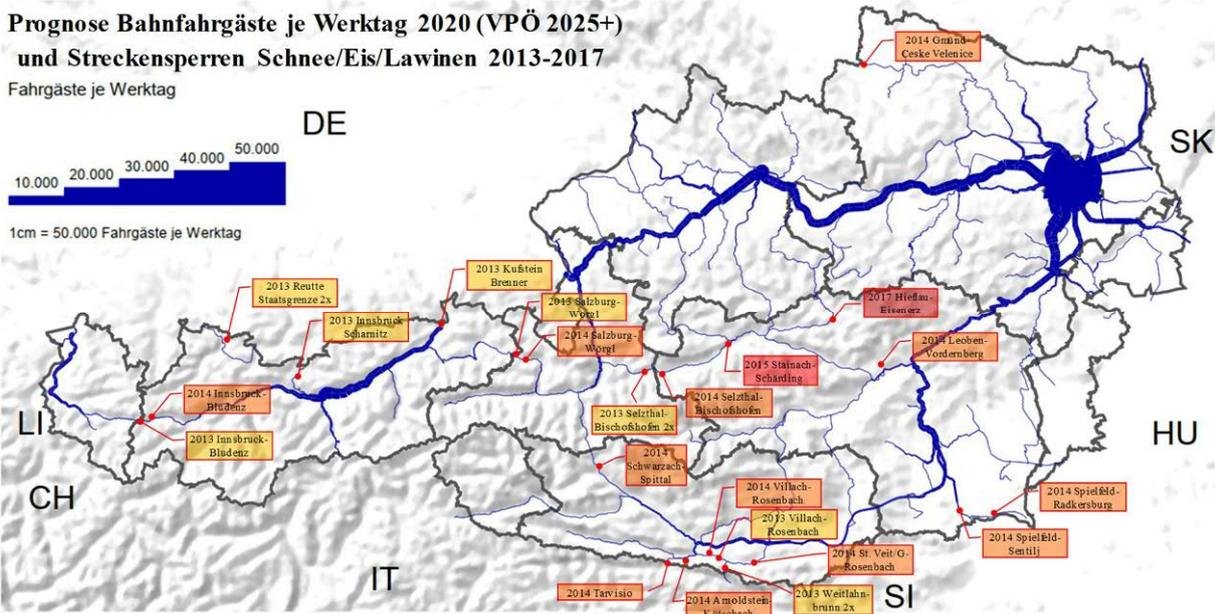


Abbildung 141: Auswertung der räumlichen Verteilung von Streckenunterbrechungen infolge Eis/Lawinen/Verwehungen von 2013 – 2017 am Netz der ÖBB (keine präventiven Sperren enthalten)

⁴³ vgl. ÖBB-INFRA (2018), MARSCHNIG, S. & VIDOVIC, I. (2018)

Betrieberschwerniskosten der ÖBB (2018)

- § Beinhalten Kosten zufolge Zugverspätungen, Umleitungen (Mehrkilometer und Verspätungen), Zugsausfällen und Schienenersatzverkehren
- § Bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sind diese Kosten im Systemisch richtiger Entscheidungen zu berücksichtigen
- § Der Katalog der Betriebschwerniskosten baut auf beispielhaften Auswertungen typischer Situationen im Netz der ÖBB auf
- § Die Referenzstrecken berücksichtigen Gleisbelastung und Anzahl, Bahnstreckenabstand und minimieren Einflüsse Nahverkehr (Stadt)
- § Bei den Kosten für Erschwernisse sind geplante Ausfälle von ungeplanten Störungen mit höheren Kosten zu unterscheiden

Zuschlagsfaktor ungeplante Sperren 2018

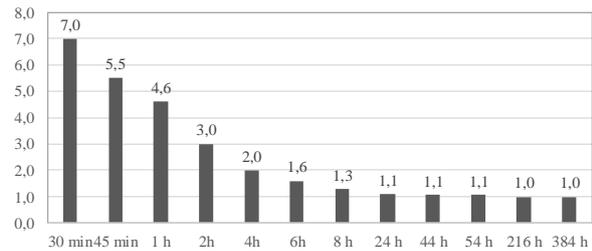


Abbildung 142: Zusammenfassung der Zuschläge zu den Betriebschwerniskosten infolge geplanter und ungeplanter Streckenunterbrechungen an eingleisigen Strecken der ÖBB (Preise 2018)

6.5.2 Schneefallcharakteristik und praktische Erfassung

Die Beurteilung der Auswirkung von Schneefallereignissen auf die Entwicklung von Schneehöhe und Schneedichte sowie die sich daraus ergebende Lawinengefahr kann sowohl durch empirische Erfahrungen, als auch durch Expertensysteme erfolgen. Weiters kann zwischen der Beurteilung einer generellen Gefahrensituation sowie von Einzelsituationen unterschieden werden. Wie in Abbildung 143 dargestellt, nimmt die kumulative Schneehöhe je nach geographischer Lage, Höhe und Region über eine Winterperiode von November bis März zu und schmilzt zwischenzeitlich bzw. insbesondere in April und März wieder ab. Ausgehend von Neuschnee mit einer mittleren Dichte von $\sim 100 \text{ kg/m}^3$ ($50\text{-}150 \text{ kg/m}^3$), Frost- und Tauwechsel sowie sonstiger Niederschlagsereignisse kommt es zu einer Schichtbildung und sukzessiven Verdichtung von Altschnee auf $200 - 400 \text{ kg/m}^3$.⁴⁴

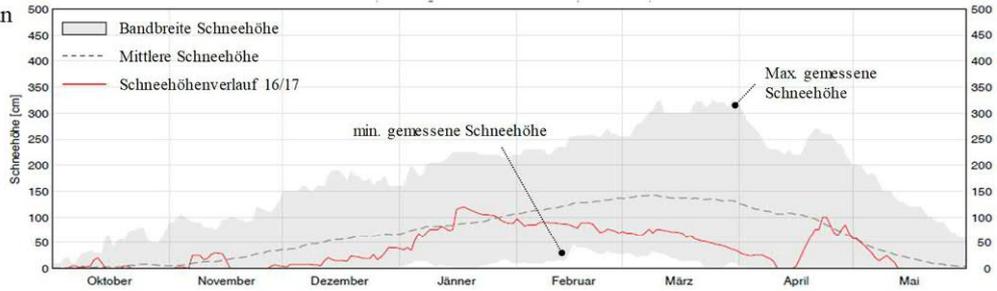
Ausgehend vom Verlauf der Lawinenwarnstufen kann die Lawinengefahr zu- oder abnehmen bzw. ist die Abgangswahrscheinlichkeit nur begrenzt vorhersagbar. Aus Sicht der Schadensfolgen für Verkehrsträger ist in der Regel die Art des Lawinenabgangs (Nassschnee, Staublawine) sowie die Gesamtschneemenge wesentlich. Je nach Situation kann der gesamte Schnee bzw. Teilmengen je nach Schichtung, Untergrund etc. abgehen, wobei Gefährdung und Schadensfolgen in der Regel mit der Schneemenge bzw. Höhe zunehmen. Ein wesentlicher Bestandteil für die empirische Beurteilung der Gefahrenlage ist die stichprobenartige Erstellung von Schneeprofilen mittels geeigneter Messverfahren. Die stichprobenartige Erfassung von Schneehöhe, Schneedichte und Schichtung wird praktisch mittels Wedgecutter, Snow Fork und Snow Tube/Sampler direkt bzw. über den Eindringwiderstand mittels Schneesonden Avatech Sp2 und MicroSnowPen ermittelt (Abbildung 144, Abbildung 145).⁴⁵

Die Erfassung der Schneehöhe und Mächtigkeit z.B. in Anbruchgebieten oder Lawinenhängen kann flächig durch Nullmessung sowie wiederholte Aufnahmen nach Schneefallereignissen mittels RBG – Bildern oder Laserscans erfolgen. Für den praktischen Einsatz wird jedenfalls aus Kostengründen eine Erfassung mit RGB – Bildern und Rekonstruktion mittels Fotogrammetrie das Mittel der Wahl sein. Aus der Literatur sind Aufnahmen mit 12-20 MP Kameras bekannt – aus heutiger Sicht ist dies in Hinblick auf Erfassungsaufwand, Flugdauer und Genauigkeit im Zentimeterbereich überholt. Handelsübliche Drohnen im Consumerbereich (2.000-4.000 €) bieten bereits 20 MP, wobei ein professioneller Einsatz mit entsprechendem Equipment (10.000 – 50.000 €) ab 36 MP beginnt. Aufgrund der raschen technischen Entwicklungen werden sich diese Grenzen in den nächsten Jahren entsprechend verschieben.

⁴⁴ vgl. RUDOLF-MIKLAU, F. et al. (2011; 2015); SCHWEIZER, J. et al. (2001)

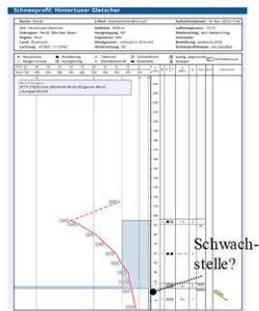
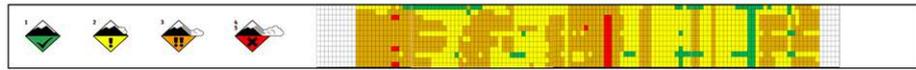
⁴⁵ vgl. CONGER, S. M. et al. (2009); HAGENMÜLLER, P. et al. (2016; 2018); PROKSCH et al. (2016); RUDOLF-MIKLAU, F. et al. (2011; 2015); ZHANG, T. et al. (2017);

Gemessene Schneehöhe an einer gewählten Messstation $h_s(t)$:



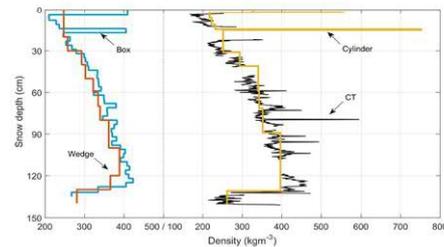
vgl. Saisonbericht der österreichischen Lawinewarndienste 2016/17 S13

Lawinenwarnstufen an Messstationen 16/17:



Schneeprofil Hintertux am 16.11.2018 (ZAMG)

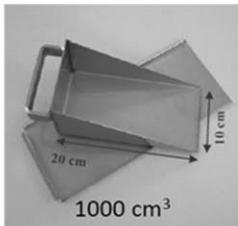
Gemessene Schneedichte nach Schneehöhe $h_s(t)$ an einer Messstation mit unterschiedlichen Instrumenten



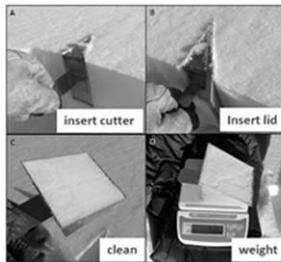
vgl. PROKSCH, M. et al. (2016)

Abbildung 143: Gemessene Schneehöhe an einer gewählten Messstation sowie Lawinenwarnstufen 2016/17 sowie Beispiel Schneeprofil mit Zusammenhang gemessene Schneedichte nach Schneehöhe

Anwendung Wedgecutter (Volumen/Gewicht):

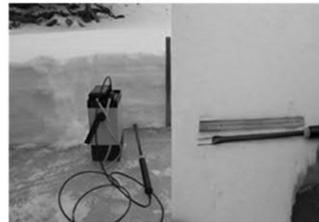


Preis KIT: 200-500 €



SNOW Fork (Schneedichte)

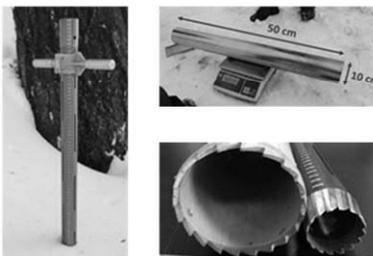
Messung in Schneegrube von Schneedichte, Wassergehalt über elektrischen Widerstand



- Wedgecutter, Sampler & Snow Tube sowie Snow Fork sind der Standard für die manuellen Dichtemessungen
- Ein mobiler Einsatz mittels Drohnen insbesondere in Lawinhängen erscheint technisch wenig sinnvoll
- Die Messmethoden können jedoch zur Validierung berührungsloser Messungen verwendet werden...

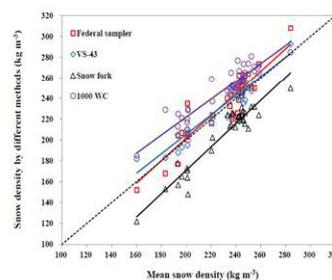
Federal Sampler und Snow Tube:

Das Schnee-Wasser Äquivalent kann an einer Skala abgelesen werden (Sampler) bzw. ergibt sich aus Gewicht und Volumen der Tube ohne/mit Schnee



Validierung: vgl. ZHANG, T. et al. (2017) u.a.

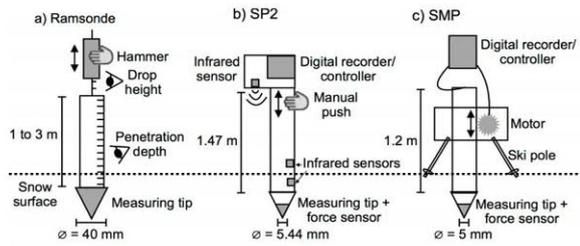
Vergleichsmessungen und Validierung



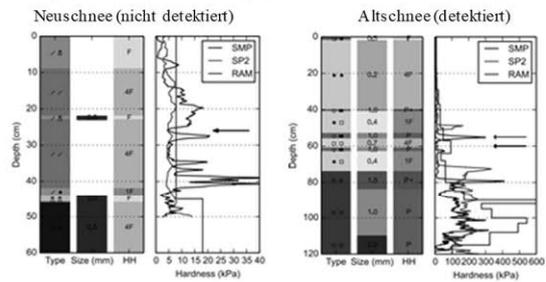
- Die Vergleichsmessungen zeigen, dass die Dichte mit Snow Fork leicht unterschätzt, mit Wedgecutter überschätzt und Sampler bzw. Tube am konsistentesten eingeschätzt werden können
- Alle Geräte sind eher preisgünstig, die Punktmessung ist eher aufwendig, kein Drohneneinsatz sinnvoll bzw. möglich

Abbildung 144: Praktische Erfassung von Schneehöhe, Schneedichte und Schichtung mittels WedgeCutter, Snow Fork und Snow Tube/Sampler mit Vergleichsmessung und Validierung

Schematische Darstellung Messprinzip:



Ergebnisse Auswertung (Neuschnee / Altschnee):



Sonde Avatech SP2:

Die Sonde Avatech SP2 zeigt die Schneestruktur nach Eindringtiefe (Profilmessung) – Preis ~ 1.500 €



Validierung: vgl. HAGENMÜLLER, P. et al. (2016; 2018), COST 032/14 (2014), Cost Action ES1404 u.a.

Sonde SnowMicroPen:

Der SnowMicroPen zeigt die Schneestruktur nach Eindringtiefe (Profilmessung) – Preis ~ k.A. €



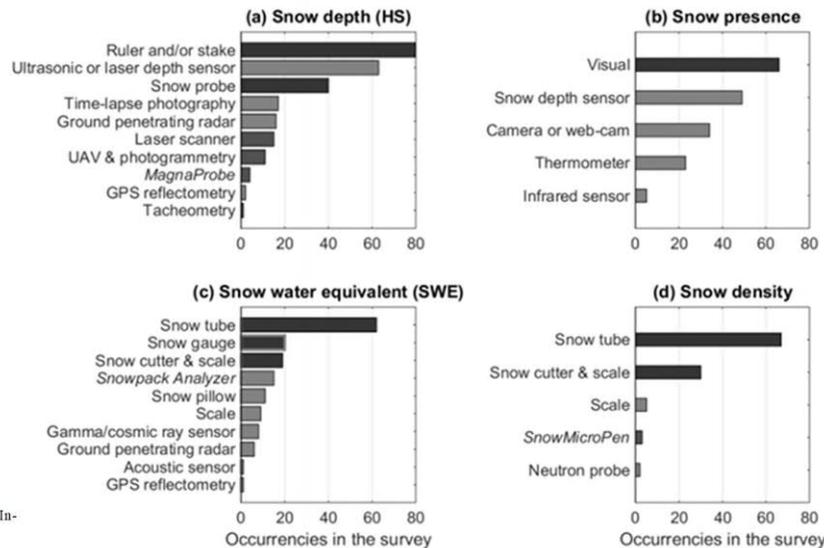
- Die als Widerstand gegen Penetration definierte Schneehärte ist ein guter mechanischer Indikator für die Stabilität
- Die Verwendung von Rammsonden oder Penetrometern erlaubt eine Messung ohne Aushub von Schneegruben
- Für eine zuverlässige Bestimmung von Lage und Ausmaß von Schwachstellen sind mehrere Messungen nötig (Punktmessung)
- Der übliche Einsatz erfolgt manuell vor Ort an repräsentativen, aber ungefährdeten Stellen durch Aufsetzen
- Ein mobiler Einsatz mittels Drohnen insbesondere in Lawinenhängen erscheint technisch eher wenig sinnvoll

Abbildung 145: Praktische Erfassung von Schneehöhe, Schneedichte und Schichtung über den Eindringwiderstand mittels Schneesonden Avatech Sp2 und MicroSnowPen

Teilnehmende Länder (Umfrage)



Häufigkeit verwendete Sensoren: Schneetiefe, Wassergehalt, Dichte, Präsenz



- (COST) Action ES1404, called "A European network for a harmonized monitoring of snow for the benefit of climate change scenarios, hydrology, and numerical weather prediction"
- Die Verwendung der Sensoren basiert auf einer umfassenden Umfrage der o.a. teilnehmenden Länder (EU+)

vgl. Cost Action ES1404 bzw. PIRAZZINI, R. et al. (2018); European In-Situ Snow Measurements: Practices and Purposes;

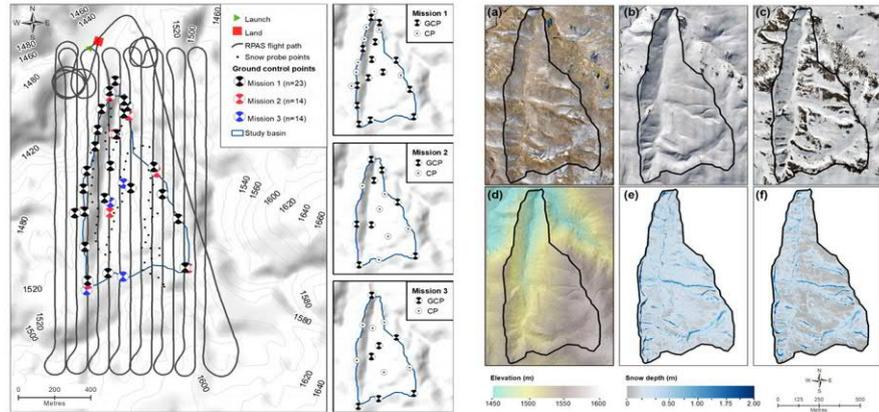
Abbildung 146: Praktische Verwendung und Häufigkeit der Verwendung von Systemen zur Erfassung und Monitoring und Bewertung der Schneelage in Europa (COST Action ES1404)

Für eine generelle Einschätzung der Gefahrensituation eignet sich die Erfassung anhand manueller Stichproben relativ gut. Für die Einschätzung konkreter Gefahrensituationen sind diese Verfahren hingegen weniger geeignet, da eine Erfassung in der Regel nur in der Nähe, aber nicht unmittelbar in einem Lawinengang erfolgen kann. Daher haben in den letzten Jahren systematische Erfassungen mittels Wetterstationen oder Methoden der Fernerkundung (Echo-Sounding, Radar, Laserscanning) an Bedeutung gewonnen. Basierend auf einem EU – Projekt ist die Verwendung der genannten Verfahren in Europa dargestellt (Abbildung 146).⁴⁶

⁴⁶ vgl. PLEWES, L. A. et al. (2001); EISEN, O. et al. (2006); HEILIG, A. (2008); PIRAZZINI, R. et al. (2018);

Für das Forschungsprojekt RISKMON von Bedeutung ist die Erfassung der Schneedeckenlage mittels Fotogrammetrie und Laserscans, da diese Verfahren eine flächendeckende und vergleichsweise kostengünstige Aufnahme erlauben (Abbildung 147)⁴⁷. Die spezifische Schichtung der Schneedecke kann in weiterer Folge über Stichproben mit den gezeigten Messmethoden oder flächig mit entsprechenden Rechenverfahren ermittelt werden (Abbildung 148)⁴⁸.

Einsatzplanung Drohne mit Kontroll- und Checkpunkten mit prozessierten Orthofotos für Herbst (a), Winter (b), Frühjahr (c) mit Höhenmodell (d) und Schneetiefe für Winter (e) und Frühjahr (f)



vgl. T. A. N. REDPATH et al. (2018); Repeat mapping of snow depth across an alpine catchment; <https://doi.org/10.5194/tc-12-3477-2018>

- Ermittlung flächiger Schneedeckenprofile mittels Drohne (Fixed Wing Trimble UX5), photogram. Differenz- aufnahmen mit 90%/80% Überlappung in Flugrichtung/seitlich mit Sony NEXSR (16 MP) in 122 m Höhe
- Die Einsatzplanung und Prozessierung erfolgte mit Trimble Inpho UAS Master® v8.0 mit Kalibration der Bilddaten relativ über GPS/Kontrollpunkte bzw. absolut über terrestrisch eingemessene Referenzpunkte
- Das Schneedeckenprofil wurde über Differenzaufnahmen generiert und mittels punktueller, wiederholter Feldmessungen überprüft (90% Konfidenzintervall $< \pm 0,14$ m)
- Zusammenfassend wird Photogrammetrie auf Basis der Umsetzungsergebnisse als geeignet für die Kartierung von Schneedeckenprofilen mit einer Genauigkeit im Dezimeterbereich angesehen

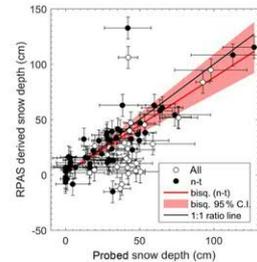
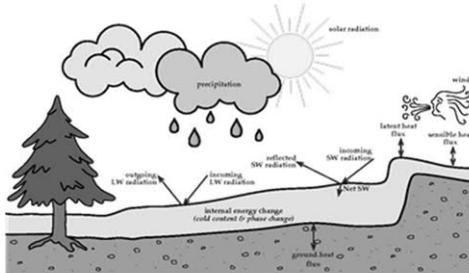
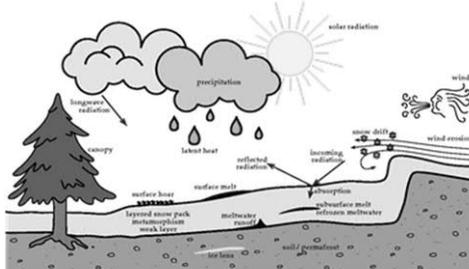


Abbildung 147: Erfassung der Schneehöhe durch fotogrammetrische Erfassung der Topographie ohne/mit Schneedecke mittels UAV und Validierung mittels Profilmessungen

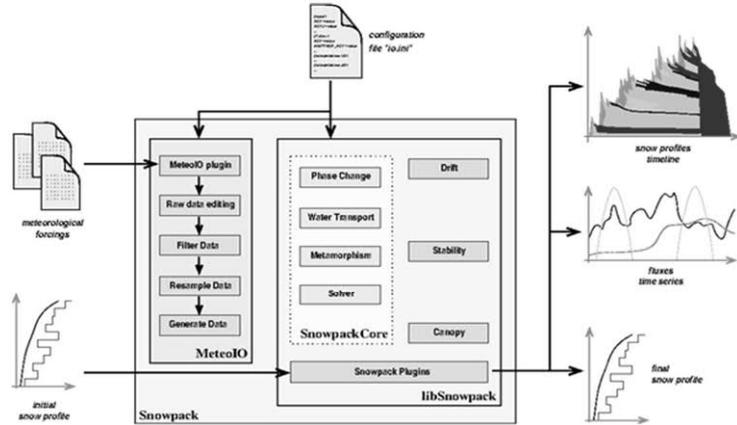
Energiebilanz Schneedecke (SNOWPACK)



Phys. Prozesse Schneedecke (SNOWPACK)



Simulation Workflow und Schneeprofile (SNOWPACK)



- Die Entwicklung der Schneedecke ist ein kontinuierlicher physikalischer Prozess, der mit den entsprechenden Modellen beschreibbar ist
- Ausgehend von Topographie, meteorologischen Daten und einer entsprechenden Kalibration kann eine standardisierte Berechnung für Lawenhänge erfolgen
- Kombiniert mit statistischen Auswertungen zur Abgangswahrscheinlichkeit der Lawinen erscheint eine spezifische Optimierung aktiver Maßnahmen machbar

Abbildung 148: Rückrechnung Schneeprofil mit Schneehöhe, Dichte und Schichtung mittels Simulation energetischer physikalischer Prozesse und von Wetteraufzeichnungen in SNOWPACK

⁴⁷ vgl. AVANZI, F. et al. (2017); REDPATH, A.N.T. et al. (2018)

⁴⁸ vgl. WEVER, N. et al. (2018), MORIN, S. et al. (2018) bzw. models.slf.ch/docserver/snowpack/html/index.html

6.5.3 Lawinenschutz und Wirtschaftlichkeit

Naturgefahren wie Überschwemmungen, Muren, Hangrutschungen und Lawinen stellen eine ständige Bedrohung der Menschen und ihrer Daseinsgrundfunktionen dar. Dementsprechend ist der effizienteste Schutz eine Vermeidung von Besiedelung und dauerhafter Nutzung im Einzugsbereich von Naturgefahren. Da sich die Gefahrenlage bei vielen Naturgefahren temporär ändert, sind entsprechende Vorwarnsysteme und eine Aufklärung von wesentlicher Bedeutung zur präventiven Vermeidung von Unfällen und Schäden. Bei begrenztem Siedlungsraum, Bevölkerungszunahme, Ausweitung von Nutzungen sowie Bau von Verkehrswegen können Naturgefahren kaum oder nur sehr eingeschränkt vermieden werden. Dementsprechend werden in diesen Fällen permanente (passive) und temporäre (aktive) Schutzmaßnahmen zur Vermeidung und/oder Verminderung von Schäden zur Anwendung kommen.

Generell stellen Lawinen eine meteorologisch und topographisch bedingte temporäre Gefahr dar. Bei Lawinengefahren werden daher neben der vorausschauenden Vermeidung durch entsprechende raumplanerische Nutzungslenkung vor allem an hochrangigen Verkehrsträgern dauerhaft wirksame bauliche Maßnahmen wie Verbauungen im Anbruchgebiet (Stütz- und Verwehungsverbauung), direkt vor dem Verkehrsträger (Ablenk-, Bremsverbauung) bzw. über dem Verkehrsträger (Tunnels, Galerien) errichtet. Je nach topographischer Situation und Höhenlage sind zudem natürliche Maßnahmen (Aufforstung, Schutzwald) eine mögliche Alternative mit permanenter Wirkung und ebenfalls vergleichsweise geringem Restrisiko.

Alternativ können aber auch temporäre Schutzmaßnahmen mit passiver Wirkung (Warnungen, Streckensperren, Evakuierung) und aktiver Wirkung (künstlicher Auslösung) angeordnet werden. Im Fall von Warnungen, Streckensperren und Evakuierungen ist mit vergleichsweise dauerhaften Nutzungseinschränkungen und Schäden zu rechnen, weshalb diese in erster Linie im Anlassfall bzw. bei untergeordneten Verkehrswegen angeordnet werden. Aktive Schutzmaßnahmen mit fixen Anlagen (Sprengmast, Seilbahn) oder direkter Einbringung (Handsprengung, Werfer) können sowohl im Anlassfall als auch präventiv gesetzt werden. Bei begrenzter Zugänglichkeit, Aufklärungserfordernis oder variablem Einsatzort haben sich zudem Hubschraubersprengungen bewährt. Da es jedoch Einschränkungen bezüglich Verfügbarkeit und Witterungsbedingungen gibt, stellt die Durchführung von Aufklärungsflügen und Sprengungen mittels Hochleistungsdrohnen eine interessante Alternative dar (Kap. 6.3).

Die Organisation von Gesellschaften sowie Interaktion in diesen ist untrennbar mit der Entwicklung von (Rechts-)Normen und Verfahren zur Vermeidung und Lösung von Konflikten bzw. Entscheidungsfindung verbunden. Der Zielkonflikt zwischen individueller Freiheit, Sicherheit und Wohlstand sowie eines sparsamen, zweckmäßigen Mitteleinsatzes ist ohne entsprechende systematische Verfahren nicht sinnvoll lösbar. Eine Lösungsmöglichkeit stellen Nutzen-Kosten-Untersuchungen (NKU) dar, da sie eine rationale und transparente Gegenüberstellung und Bewertung von positiven oder negativen Wirkungen von Investitionen erlauben. Sie finden in allen Stufen der Planung Verwendung und sind auch in Österreich seit Jahrzehnten ein etabliertes Instrument in der wirtschaftlichen Rechtfertigung des Einsatzes öffentlicher Mittel zum Schutz vor Naturgefahren. In der Konzeption und Beurteilung von Schutzmaßnahmen hat sich zudem ein stufenweises Vorgehen mit sukzessiver Verfeinerung und Ausschluss ungeeigneter Alternativen bewährt. Dementsprechend ist es vielfach schon auf Basis einer erfahrungsbasierten qualitativen Abschätzung möglich eine Vorauswahl an Lösungen zu treffen, die dann in weiterer Folge quantitativ untersucht werden und Basis für anschließende Verfahren sind.⁴⁹

⁴⁹ vgl. RUDOLF-MIKLAU, F. et al. (2011) S144-154; MARGRETH, S. et al. (2008); BMNT (2019)

Eine Weiterentwicklung in der wirtschaftlichen Beurteilung von Investitionen stellt die Lebenszykluskostenanalyse auf Basis der Kapitalwertmethode dar. Sie erlaubt eine Gegenüberstellung von unterschiedlichen Maßnahmen auf Basis von Kosten und Wirkdauern im Lebenszyklus von Anlagen der Verkehrsinfrastruktur. Die Lebenszykluskostenanalyse kann sowohl generalisiert (Netzebene) als auch spezifisch für konkrete Fragestellungen angewandt werden. Die Berechnung kann deterministisch ohne Berücksichtigung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schwankungsbreiten auf Basis von Mittelwerten oder Extremwerten erfolgen. Die Modellierung von Einzelrisiken ist dann jedoch nur über Szenarien möglich, was eine Beurteilung deren Eintrittswahrscheinlichkeit erschwert, die Ergebnisse verzerrt und einen suboptimalen Mitteleinsatz zur Folge haben kann. Bei stochastischer Betrachtung wird die Bandbreite von Ereignissen oder Kosten über deren Eintrittswahrscheinlichkeit berücksichtigt. Dementsprechend kann ein regelmäßiges Ereignis mit geringen Kosten (z.B. 50.000 € \times 2x pro Jahr = 100.000 €/Jahr) dieselben risikobewerteten Auswirkungen wie ein Extremereignis (z.B. 10 Mio. € alle 100 Jahre = 100.000 €/Jahr) aufweisen.⁵⁰

Im Forschungsprojekt RISKMON wird auf dieser Basis ein neuer Lebenszykluskostenansatz entwickelt, der eine Gegenüberstellung und Management von aktiven und passiven Lawinenschutzmaßnahmen für die gesamte Bandbreite möglicher Ereignisse erlaubt (6.5.4). Grundlage dafür ist eine umfassende Ereignisauswertung und ein Simulationsmodell für Schneefallereignisse und Schneefallhöhen (Kap. 6.5.5). Die beispielhafte Anwendung mit den in Abbildung 149 dargestellten Kosten und Annuitäten erfolgt aus Sicht des Infrastrukturbetreibers (Kap. 6.5.6) und ist entsprechend um andere Aspekte (Nutzer, Volkswirtschaft, Umwelt) erweiterbar.⁵¹

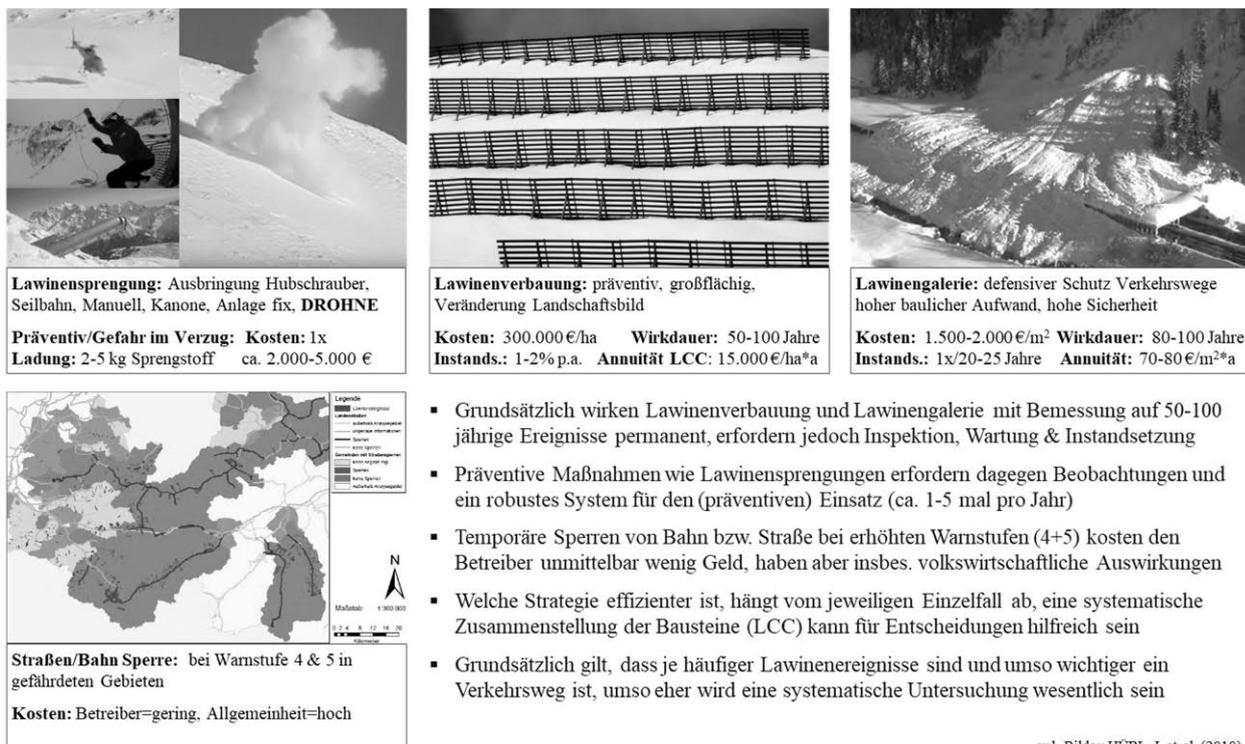


Abbildung 149: Gegenüberstellung aktiver und passiver Lawinenschutzmaßnahmen für den Vergleich der Lebenszykluskosten der Szenarien als Basis von SWOT und LCC - Analyse

⁵⁰ HOFFMANN, M. (2018) S227-242

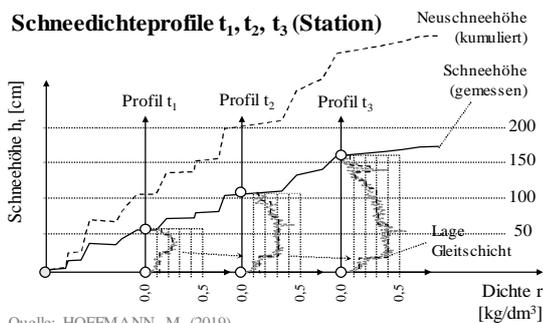
⁵¹ ILLMER, D. et al. (2015); GUBLER, H. et al. (2011); BRUCKER, A. (2013) sowie BUCHINGER, S. (2014)

6.5.4 Lebenszykluskostenmodell

Gemäß Literatur sind Lawinen bzw. Lawinenabgänge komplexe physikalische Prozesse deren Mechanismus nur ansatzweise bekannt ist und auch in Zukunft kaum für jeden Einzelfall erfassbar sein wird. Der Zeitpunkt des Lawinenabgangs hängt zudem von meteorologischen Faktoren (Neuschnee, Regen, Tauvorgang, Wind) bis hin zu Auslöseereignissen ab, die sich nur beschränkt vorher-sagen lassen. Dementsprechend gibt es keine allgemein anerkannte Lösung, sondern zahlreiche unterschiedliche Ansätze⁵². Für den in der Folge vorgestellten Lebenszykluskostenansatz ist die Vorhersage eines konkreten Abgangszeitpunkt nicht erforderlich. Vielmehr soll durch einen präventiven Einsatz kostengünstiger aktiver Maßnahmen der Eintritt größerer Ereignisse präventiv verhindert werden. Je nach Eingriffshäufigkeit und verbleibendem Restrisiko ergeben sich dementsprechend jährliche Kosten für aktive Maßnahmen im Vergleich zu herkömmlich dimensionierten passiven Schutzmaßnahmen. In weiterer Folge kann dann auch die gesamte Ereignisbandbreite in der Dimensionierung und Instandhaltung passiver Schutzmaßnahmen bzw. Restrisiken und Schäden an Anlagen berücksichtigt werden.

Wie in Abbildung 150 (links) dargestellt gibt es einen systematischen Zusammenhang zwischen kumulierter gefallener Neuschneemenge und kumulierter Altschneehöhe sowie Entwicklung der Schneedichte-Verteilung. Die kumulativen Schneehöhen einzelner Schneefallereignisse und der Gesamtschneemenge eines Winters sind linksschief verteilt d.h. Extremereignisse sind entsprechend selten. Die „a priori“ Abgangswahrscheinlichkeit ist zeitlich vergleichsweise breit verteilt und ist u.a. von Schneehöhe, Witterung und Hangneigung abhängig (Abbildung 150 rechts). Für den Einzelfall lässt sich diese Bandbreite auf Basis von empirischen Erfahrungen, systematischer Messung, statistischen Auswertungen und Modellierung erheblich einschränken, wodurch der voraussichtliche Abgangszeitpunkt besser eingrenzbar ist. Weiters wird der potenzielle Schaden mit der Schneehöhe sowie Anzahl der betroffenen Personen, Anlagen und Nutzungen im Lawinenkegel ansteigen. Dementsprechend lässt sich anhand von Simulationen für jeden Fall die jeweils kritische Schneehöhe sowie die resultierenden Auswirkungen abschätzen.

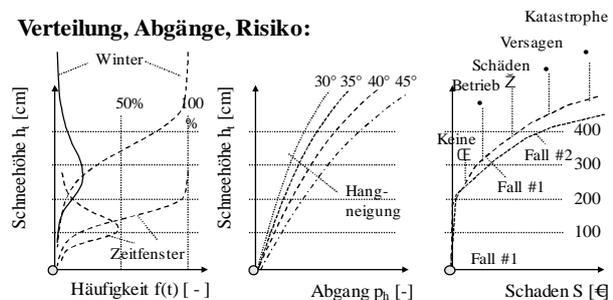
Schneedichteprofile t_1, t_2, t_3 (Station)



Quelle: HOFFMANN, M. (2019)

- § Die Schneefallmenge kumuliert sich sukzessive mit jedem Schneefallereignis über den Winter
- § Wetterstationen messen neben Temperatur, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte die tägliche Neuschneemenge
- § Die Dicke der Schneedecke ergibt sich aus den kumulierten Neuschneemengen sowie Verfrachtungs- und Tauprozessen
- § Gemäß der Extremwertstatistik sind große Neuschneemengen und kumulierte Schneehöhen vergleichsweise selten
- § Die Schneehöhenverteilung entspricht somit nicht einer Normalverteilung, sondern ist linkssteil/rechtsschief

Verteilung, Abgänge, Risiko:



- § Die Abgangswahrscheinlichkeit von Lawinen ist eine Funktion von Schneehöhe, Zustand, Hangneigung und anderen Faktoren
- § Der Schaden steigt mit der Schneehöhe/menge sowie der Anzahl der betroffenen Anlagen und Personen im Lawinenkegel
- § Für jede Situation kann eine Schneehöhe mit max. kurzzeitigen betriebl. Einschränkungen im Lawinenfall ermittelt werden
- § Hypothese #1: Die Abgangswahrscheinlichkeit lässt sich hinreichend über Neuschneemenge & Hangneigung abbilden
- § Hypothese #2: Eine Begrenzung der Schneehöhe verringert das Abgangsrisiko und das resultierende Schadensausmaß

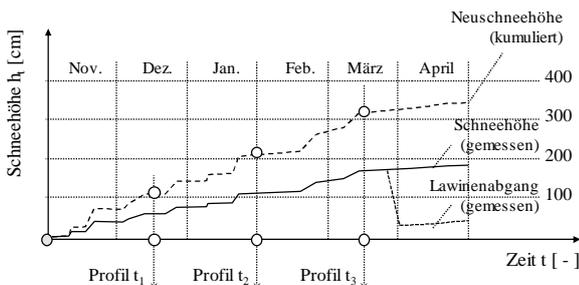
Abbildung 150: Systematischer Zusammenhang zwischen Neuschneemenge und Altschneedicke mit Abgangsverteilung, Hangneigung und Schadensausmaß nach kumulativer Neuschneehöhe

⁵² vgl. MARGRETH, S. et al. (2008); RUDOLF-MIKLAU, F. et al. (2011)

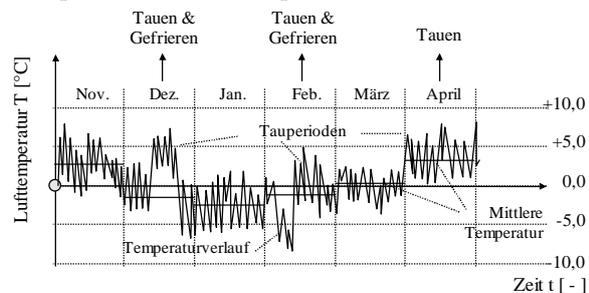
Aus der Kombination von Eintrittswahrscheinlichkeit von kumulativen Schneehöhen, Witterungsbedingungen und anderen Einflussfaktoren sowie tatsächlichem Abgangszeitpunkt lassen sich zudem Modelle für eine bessere Vorhersage der Abgangswahrscheinlichkeit ableiten (z.B. NXD-Modelle wie VERBUND, BFW). In Weiterer Folge kann aus der Eintrittswahrscheinlichkeit kumulierter Neuschneemengen sowie den Schadensszenarien nach Schneehöhe die möglichen Beeinträchtigungen z.B. von Verkehrsträgern samt Eintrittswahrscheinlichkeit ableiten. Mit ergänzenden punktuellen oder flächigen Messungen (Kap. 6.5.2) ist auf dieser Basis zudem eine bessere Einschätzung im Einzelfall möglich (Abbildung 151). Im Gegensatz zu passiven Lawinenschutzmaßnahmen kann mittels aktiver Lawinenauslösung zudem eine Überschreitung kritischer Schneehöhen (Threshold) vermieden werden. Bei entsprechender laufender Überwachung sowie Rechenmodellen ist es auf dieser Basis möglich, rechtzeitig aktive Schutzmaßnahmen (z.B. Lawinensprengung) zusammen mit temporären Streckensperren zu setzen.

Während passive Schutzmaßnahmen auf Extremereignisse dimensioniert sind, beugen aktive Schutzmaßnahmen der Entstehung von Lawinen mit hohen Schadensfolgen vor. Die Eingriffshäufigkeit dieser aktiven Schutzmaßnahmen hängt von dem jeweiligen kritischen Threshold ab und ist „a priori“ für jeden Winter bzw. Einsatzgebiet zufällig verteilt. Auf Netzebene ist dagegen die mittlere Eingriffshäufigkeit aus Höhenverteilung, Threshold und Anzahl Lawinenhänge an dem jeweiligen Verkehrsträger zuverlässig ermittelbar. Aus der mittleren Anzahl erforderlicher Eingriffe lassen sich in weiterer Folge die jährlichen Kosten aktiver Schutzmaßnahmen mit den jährlichen Kosten von passiven Schutzmaßnahmen vergleichen (Abbildung 152). Das verbleibende Restrisiko wird sich je nach Eingriffsschwelle und Maßnahmentyp unterscheiden und ist ebenfalls in die Lebenszykluskostenrechnung miteinzubeziehen. Die sich in Summe ergebenden Kosten können in weiterer Folge dem Nutzen dieser Maßnahmen in Form erhöhter Erreichbarkeit, vermiedener Ausfälle und Schadensfolgen für Personen und Anlagen gegenübergestellt werden. Für eine effiziente Maßnahmenwahl und Einsatzoptimierung an Lawinenhängen wird zudem der Aufbau eines Managementsystems zu empfehlen sein.

Neuschneemenge h_i und Dicke Schneedecke (Station)

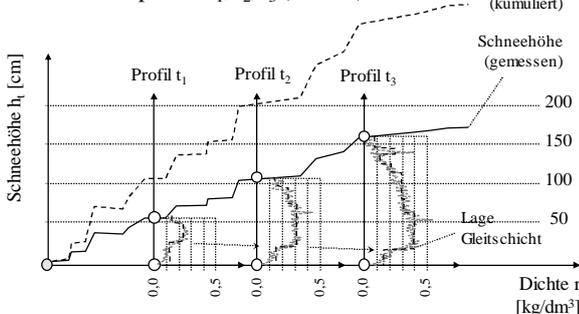


Temperaturverlauf und Tauphasen (Station)



Quelle: HOFFMANN, M. (2019)

Schneedichteprofile t_1, t_2, t_3 (Station)

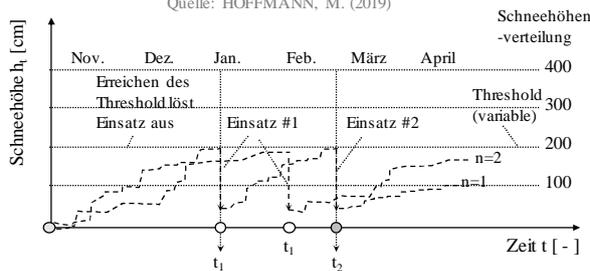


- § Neuschnee weist je nach Niederschlagstemperatur eine Dichte zwischen $0,1$ bis $0,2 \text{ kg/dm}^3$ auf
- § Altschnee verdichtet sich aufgrund von Eigengewicht sowie Tau- und Gefriervorgängen auf $0,2$ bis $0,4 \text{ kg/dm}^3$
- § Die Dichte nimmt mit Schneehöhe und Tiefe zu und ist eine Funktion u.a von Temperaturverlauf und Niederschlägen
- § Tatsächliche Schneehöhe und Dichte können durch punktuelle Messungen (z.B. Cutter, Sampler) bestimmt werden
- § Eine flächige Erfassung der Schneedeckenlage ist mittels Fotogrammetrie oder Laserscan sowie Simulation möglich
- § Hypothese #3: Mit Neuschneemenge, Temperaturverlauf und Kalibration lässt sich die Schneehöhe rechnerisch ermitteln

Abbildung 151: Systematischer Zusammenhang zwischen Neuschneemenge und Altschneedicke mit Temperaturverlauf, Tauphasen sowie Schneedichteprofilen

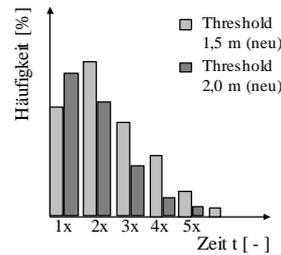
Auswertung/Simulation Strategien (n=1-1.000):

Quelle: HOFFMANN, M. (2019)

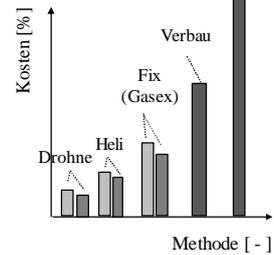


- § Die Abgangswahrscheinlichkeit ist über statistische Auswertung mit Messstation und entsprechenden Aufzeichnungen ableitbar
- § Die kritische Schneehöhe ist durch aktive und passive Schutzmaßnahmen bzw. gezielte Lawinenauslösung beeinflussbar
- § Passive Schutzmaßnahmen (Lawinerverbau, Galerien) werden dementsprechend auf seltene Extremereignisse dimensioniert
- § Aktive Schutzmaßnahmen beugen dem Entstehen von Lawinen permanent vor (Wald) oder Reduzieren deren Höhe (Auslösung)
- § Die Eingriffshäufigkeit temporärer aktiver Schutzmaßnahmen ergibt sich aus der Schneehöhenverteilung und kritischen Höhe

Häufigkeit Einsätze:



Ø Annuität LCC: Einhausung



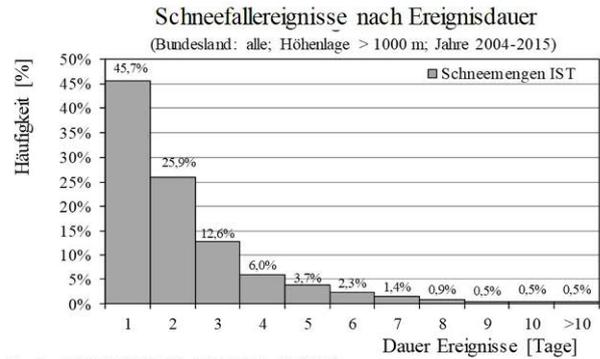
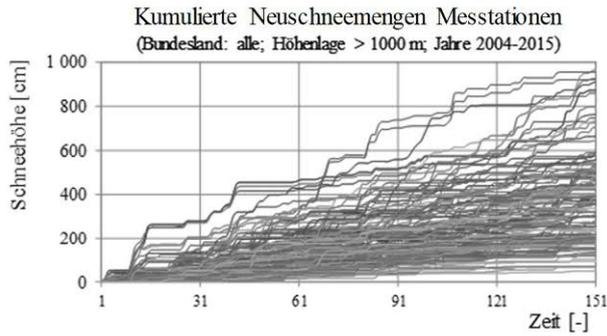
- § Auf Netzebene ist die mittlere Eingriffshäufigkeit aus Höhenverteilung, Threshold und Anzahl Lawinenhänge ermittelbar
- § Im Einzelfall sind kritische Schneehöhen durch aktive Schutzmaßnahmen bei Erreichen des Thresholds beherrschbar
- § Die Lebenszykluskosten aktiver und passiver Maßnahmen sind über ihre Kosten und Wirkdauer sowie Restrisiko bezifferbar
- § Hypothese #5: Der Vergleich der Annuitäten erlaubt eine hinreichend genaue Abschätzung für Investitionsentscheidungen
- § Hypothese #6: Aktive Maßnahmen verursachen wesentlich geringere Kosten, sind aber anspruchsvoller im Management

Abbildung 152: Ermittlung der Anzahl erforderlicher Eingriffe aus statistischer Auswertung bzw. Simulation mit resultierenden jährlichen Kosten aktiver und passiver Lawinenschutzmaßnahmen

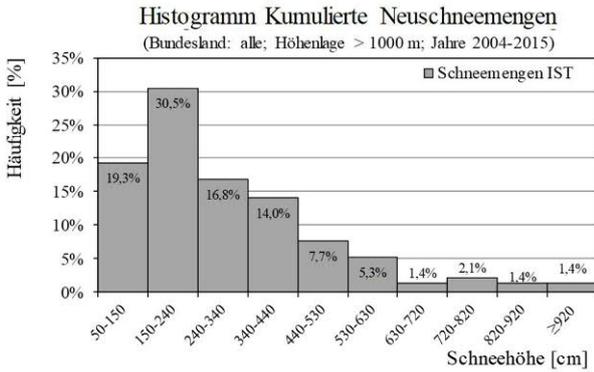
6.5.5 Ereignisauswertung und Simulationsmodell

In der Folge sollen nun die theoretischen Überlegungen zu Schneefallereignissen, kumulierten Neuschneemengen, Dauer von Schneefallereignissen sowie Häufigkeitsverteilung der Neuschneemengen je Ereignis bzw. Jahr validiert werden. Dazu erfolgt eine Auswertung aller Schneefallereignisse in Österreich an allen Messstationen über 1.000 m für den Zeitraum 2004 bis 2015. Die in Abbildung 153 dargestellten Ergebnisse zeigen die kumulierten Neuschneemengen je Messstation sowie die Verteilung von Ereignisdauer und kumulierter Neuschneemenge. Wie erwartet ist die kumulierte Neuschneemenge linksschief verteilt und die Wahrscheinlichkeit von Schneefallereignissen größerer Dauer nimmt exponentiell ab. Dies ist insofern wesentlich, als die in Abbildung 154 ausgewertete kumulierte Neuschneemenge im Schnitt linear mit der Ereignisdauer zunimmt. Weiters dargestellt ist die Verteilung der Schneefallereignistage je Wintersaison, die ebenfalls mit der kumulativen Neuschneemenge je Winter korreliert ist.

Auf Basis der statistischen Auswertung der Schneefallereignisse lässt sich weiters die für die Lebenszykluskosten aktiver Schutzmaßnahmen wesentliche Verteilung der Eingriffshäufigkeit nach kumulierter Neuschneemenge ableiten. Wie in Abbildung 154 dargestellt, ergibt sich z.B. für eine Neuschneehöhe von 2,0 m als Threshold (ca. 0,5 – 1,0 m Altschnee) eine 39% Chance für keinen Eingriff, 40% Chance für 1 x Eingriff, 16% Chance für 2 x Eingriff und je 3% Chance für 3x oder 4x Eingriff. Der Erwartungswert für einen Eingriff im langjährigen Schnitt würde in diesem Fall bei 1x Eingriff pro Jahr liegen. Liegt der kritische Grenzwert mit 1,0 m niedriger so sind mit 2,36x deutlich mehr Eingriffe pro Jahr erforderlich bzw. mit 3,0 m sinkt die Zahl erforderlicher Eingriffe auf 0,49x pro Jahr. Weiters ist zu beachten, dass die für die jeweilige Nutzung bzw. Verkehrsinfrastruktur kritische Neuschneemenge im Einzelfall zum Teil erhebliche Unterschiede aufweisen kann. Daher empfiehlt es sich für die konkrete Planung entsprechende Simulationsrechnungen mit unterschiedlichen Neuschneemengen durchzuführen. Die zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeit kann dann aus der gezeigten statistischen Auswertung der tatsächlichen Ereignisse ermittelt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit bei begrenzter Datenlage sind kalibrierte Simulationsmodelle. In der Folge soll nun beispielhaft ein solches Simulationsmodell entwickelt und dargestellt werden.

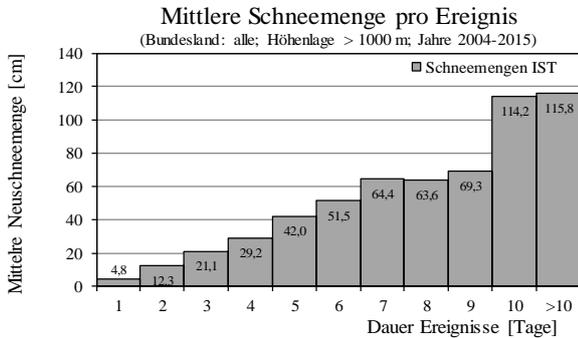


Quelle: HOFFMANN, M. & DONEV, V. (2019)



- Die Schneefallmenge kumuliert sich sukzessive mit jedem Schneefallereignis über den Winter
- Der vorhandene Schnee ist aufgrund von Schmelzprozessen und Eigengewicht deutlich dichter gepackt (= kleinere Höhe)
- Die Auswertung zeigt, dass die Schneehöhenverteilung nicht Normal sondern linkssteil/rechtsschief verteilt ist
- Der überwiegende Anteil der Schneefallereignisse dauert 1 – 3 Tage bei fast linearem Anstieg der Schneefallmengen je Tag
- Schwierig für aktive Maßnahmen in mobilem Einsatz sind mehrtägige Starkschneefallereignisse mit kritischen Mengen
- Solche Extremereignisse sind jedoch tatsächlich relativ selten

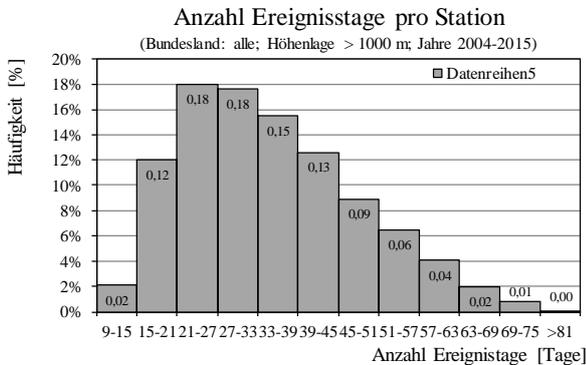
Abbildung 153: Kumulierten Neuschneemengen, Dauer von Schneefallereignissen sowie Häufigkeitsverteilung der Neuschneemenge an den verfügbaren Messtationen über 1000 m von 2004 – 2015 (AUT)*



Anzahl der Eingriffe nach Eingriffshöhe (Neuschnee)

Eingriffe	(h=100)	(h=150)	(h=200)	(h=250)	(h=300)	(h=350)	(h=400)
0	0,07	0,19	0,39	0,51	0,59	0,67	0,76
1	0,34	0,42	0,40	0,36	0,35	0,28	0,21
2	0,19	0,22	0,16	0,09	0,05	0,05	0,03
3	0,20	0,11	0,03	0,04	0,01	0,00	0,00
4	0,09	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mittel	2,34	1,46	0,92	0,65	0,49	0,38	0,27
Median	2,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quelle: HOFFMANN, M. & DONEV, V. (2019)



- Die mittlere Schneemenge je Schneefalltag steigt nahezu stetig mit der Ereignisdauer in Tagen (aber größere Dauer = seltener)
- Die Anzahl der Schneefallereignistage ist linkssteil bzw. rechtsschief verteilt, die Ereignisdauer nimmt asymptotisch ab
- Die kumulative Neuschneemenge einer Wintersaison korreliert stark mit der Anzahl der Ereignistage ($R^2 \sim 0,75$)
- Aus der statistischen Auswertung (sehr begrenzter Zeitraum) ergibt sich die Eingriffshäufigkeit nach Neuschneehöhe
- Je nach Eingriffsschwelle, resultierender Häufigkeit, Anzahl der Hänge und Eingriffskosten ergibt sich der Budgetbedarf
- Weiters lässt sich so auch das Zeitfenster für Eingriffe bestimmen

Abbildung 154: Mittlere Schneemenge je Ereignis, Häufigkeitsverteilung der Ereignistage sowie Anzahl erforderlicher Eingriffe nach Neuschneehöhe für Messtationen über 1000 m von 2004 – 2015 (AUT)*

*Das Modell gibt die generellen Auswirkungen und Eingriffshäufigkeit auf Basis der direkt messbaren Neuschneemenge an. Die Beurteilung der Einwehnsituation kann generell durch Anpassung/Herabsetzung des Threshold für den präventiven Eingriff bzw. für den Einzelfall über Erfahrungswerte oder Messungen (Stichprobe, flächig mit Drohnen) erfolgen.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Naturgefahren folgt meist keiner Normalverteilung, sondern weist vielfach einen ausgeprägten mittleren Bereich sowie einen extrem langgezogenen Extremwertbereich („Fat Tail“) auf. Im Gegensatz zu vielen anderen Prozessen führt dies dazu, dass Extremereignisse für längere Zeit kaum beobachtbar sind, wodurch deren Eintritt in der Wahrnehmung zunehmend an den Rand der Vorstellungskraft gedrängt wird. Treten diese seltenen Extremereignisse („Black Swans“) dann unvermittelt ein, sind die Folgen aufgrund mangelhafter Vorbereitung bzw. Investitionen oft gravierend. Zudem kommt es neben dem Zusammenbruch des Sicherheitsgefühls zu einer Suche nach den Schuldigen, bis sich die Gefahrenlage beruhigt hat und das Extremereignis vor den Anforderungen des Alltags in den Hintergrund tritt. Die Modellierung solcher extremen Ereignisse ist ein eigener Forschungszweig in der Statistik, der in den letzten beiden Jahrzehnten im Risikomanagement zunehmend an Bedeutung gewonnen hat und deren Ansätze in der Folge berücksichtigt werden.⁵³

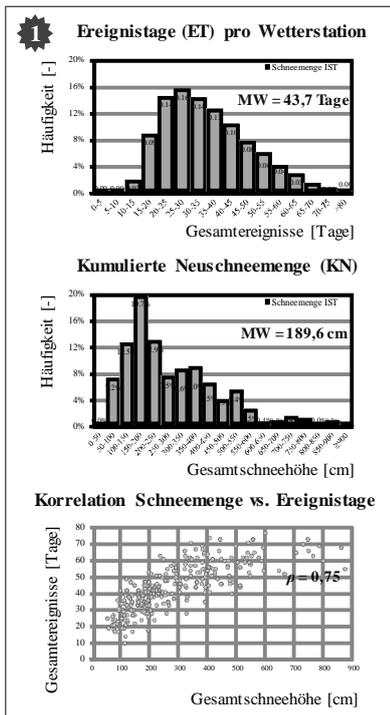
Die Zielsetzung in RISKMON ist es, ein Modell zur Simulation von täglichen Schneefallereignissen und Schneefallmengen zu schaffen, welches in Ereignisdauer, kumulierter Schneefallmenge sowie Anzahl an Ereignistagen möglichst nahe an die Wirklichkeit kommt. Bei entsprechender Kalibration soll dieses Modell eine Vorhersage von Eintrittswahrscheinlichkeiten bei begrenzter Datenlage erlauben. Zudem sollen auf dieser Basis in der Folge Lawinensimulationen und Investitionsstrategien optimiert werden können. In einem ersten Schritt wird dazu die Korrelation zwischen den Ereignistagen eines Winters und der kumulierten Neuschneemenge ausgewertet ($\rho=0,75$). In einem zweiten Schritt werden die empirischen Verteilungen der Ereignistage je Station sowie die kumulierte Schneefallmenge durch stetige Verteilungen angenähert. In einem dritten Schritt werden daraus entsprechend verteilte korrelierte Zufallszahlen generiert (Abbildung 155). Da die Abfolge und Dauer von Schneefallereignissen jedoch nicht zufällig sind, wird in einem vierten Schritt die Abhängigkeit vom Wetter der Vortage mittels serieller Korrelation bestimmt ($\rho=0,60$). Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Schritt 3 und 4 lassen sich daraus in einem fünften Schritt die korrelierten Dauern aufeinander folgender Schneefallereignisse generieren (Abbildung 156). Weiters sind die Neuschneemengen eines Ereignistages unter Berücksichtigung der Korrelation mit der kumulierten Neuschneemenge je Monat bzw. eines Winters in einem sechsten Schritt zu generieren ($\rho=0,25$). Im siebten und achten Schritt ergeben sich aus den generierten Zufallszahlen die monatlichen und jährlichen kumulierten Neuschneemengen (Abbildung 157).

Zur Sicherstellung der Validität des Simulationsmodells für Schneefallereignisse, Schneefallmengen und Ereignisdauer sowie kumulierte Schneehöhen ist eine Gegenüberstellung mit den empirischen Ergebnissen erforderlich. Abbildung 158 belegt die sehr gute Eignung des entwickelten Modells anhand der Gegenüberstellung der empirischen Verteilung der Ereignisdauern und der kumulierten Neuschneemengen mit den Simulationsergebnissen. Die Forschungsarbeit in RISKMON hat damit gezeigt, dass eine realistische Simulation von Schneefallereignissen möglich ist. Da die Datenlage im Auswertzeitraum begrenzt war und Extremereignisse selten sind, wird eine Kalibration und Verfeinerung des entwickelten Modells anhand eines möglichst großen Zeitraumes für die Zukunft sinnvoll sein. Eine solche Auswertung würde dann auch eine regionspezifische Kalibration und Simulation der Ereignisse nach Höhenlage erlauben. Aufgrund der Ereignisse im Auswertzeitraum kann jedoch mit hoher Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse für eine erste Abschätzung in den folgenden Anwendungsbeispielen ausreichend genau sind.

⁵³ vgl. PFEIFER, D. (1989); TALEB, N. N. (2010)

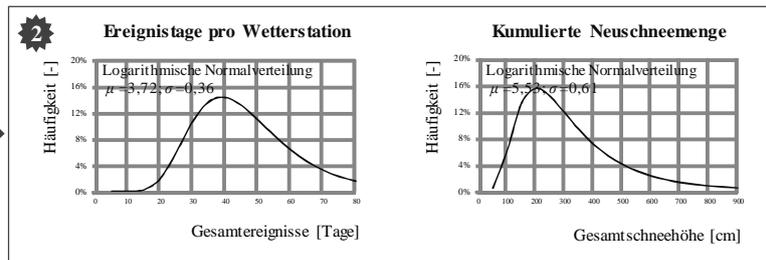
Empirische Wetterdaten

Alle Bundesländer, Höhenlage > 1000 m, Jahre 2004-2015)



Fitting mit stetigen Verteilungen

z.B. logarithmische Normalverteilung für Simulation → Extremwertstatistik



Ereignistage und Gesamtschneemenge (korreliert)

Auf Basis korrelierter lognormalverteilter Zufallszahlen für alle Stationen

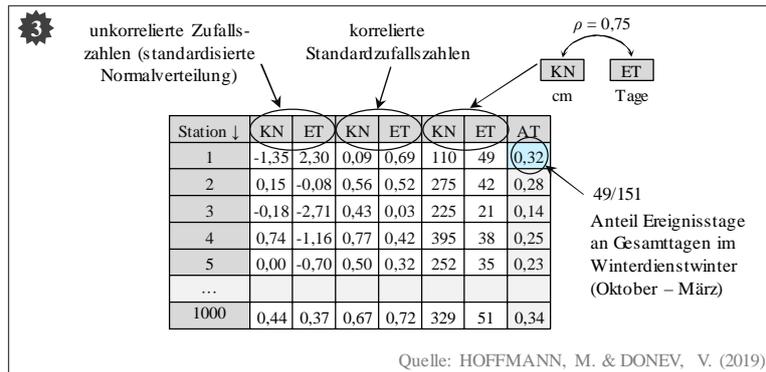
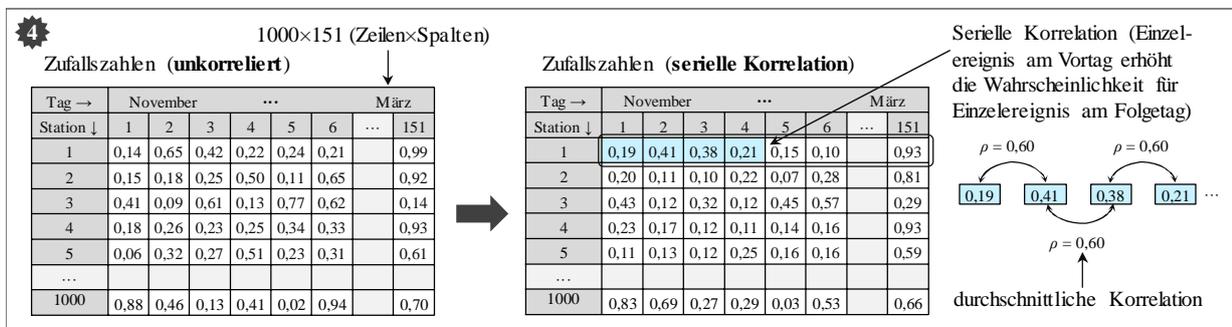


Abbildung 155: Ermittlung der Ereignistage und kumulierten Neuschneemengen aus der Generation korrelierter Zufallszahlen auf Basis der empirischen Wetterdaten

Serielle Korrelation von Einzelereignissen

Einzelereignisse sind untereinander korreliert → Zufallszahlen mit serieller Korrelation



Simulation aufeinanderfolgender Einzelereignisse

Einzelereignisse folgen aufeinander → Auswertung Ereignisdauer

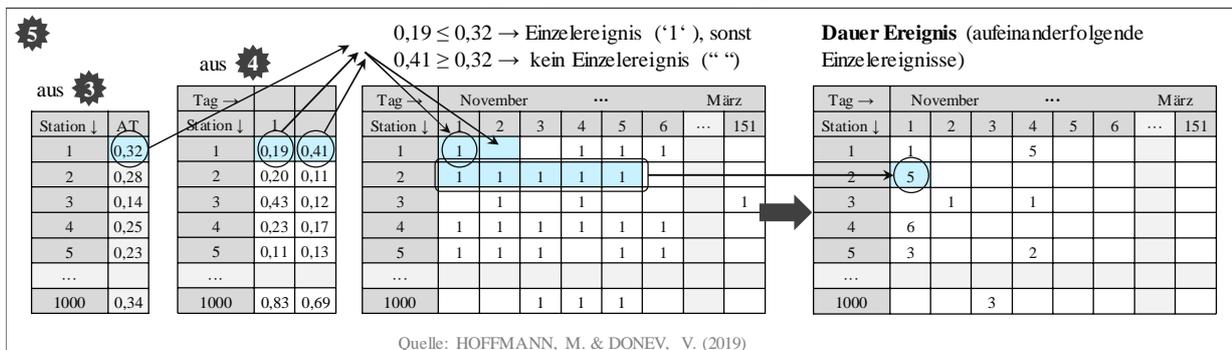


Abbildung 156: Bestimmung der seriellen Korrelation von Einzelereignissen und Simulation aufeinanderfolgender Einzelereignisse bzw. der jeweils resultierenden Ereignisdauern

Generierung der Neuschneemenge der Einzelereignisse

Die Neuschneemenge für Einzelereignisse korreliert mit der kumulierten Neuschneemenge → Zufallszahlen mit Korrelation

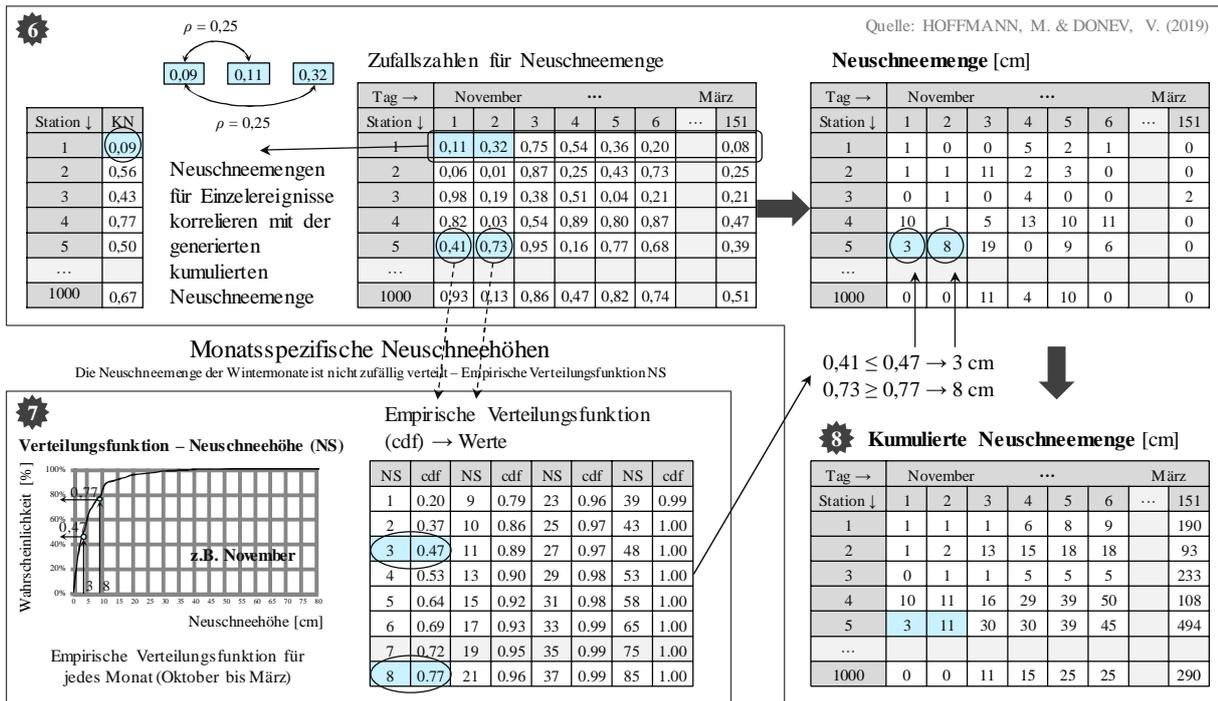


Abbildung 157: Generierung der Neuschneemengen für Einzelereignisse und der monatsspezifischen Neuschneehöhen auf Basis der empirischen monatlichen Verteilungsfunktion

Überprüfung der Simulationsergebnisse für Ereignisdauer und kumulierte Neuschneemenge IST VS SIM

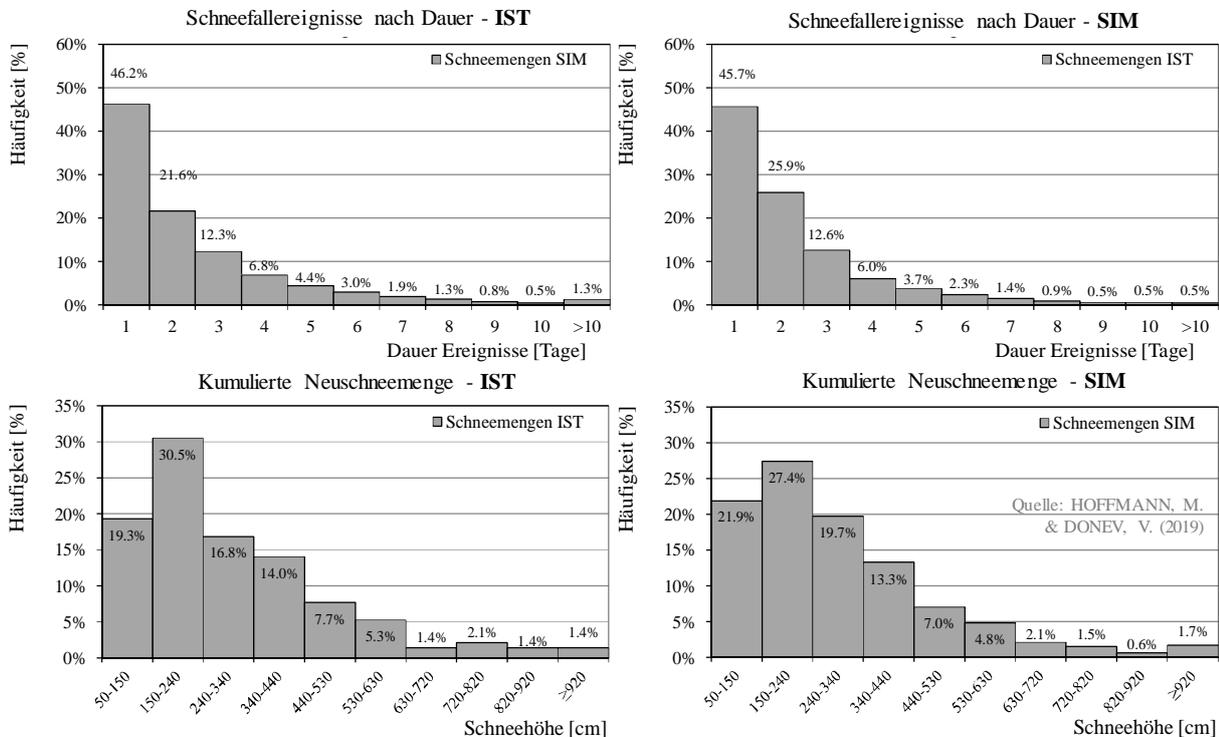


Abbildung 158: Gegenüberstellung und Überprüfung der Simulationsergebnisse für die Ereignisdauer und kumulierten Neuschneemengen mit den Werten der Messstationen >1000 m von 2004 – 2015 (AUT)

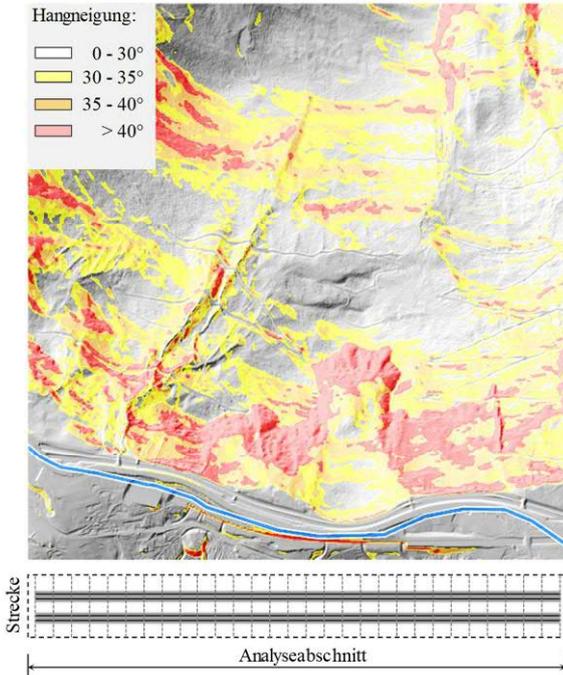
6.5.6 Anwendungsbeispiele und Ergebnisse

Die Anwendungsbeispiele sollen typische Anwendungsfälle von aktiven und passiven Lawinenschutzmaßnahmen sowie deren Vergleich mit dem entwickelten Lebenszykluskostenansatz demonstrieren. Die überschlägigen Berechnungen basieren daher auf stark vereinfachten generalisierten Annahmen. Insbesondere die Schadensfolgen nach Neuschneemenge bzw. Lawinengröße sind für die gegebene Situation im Einzelfall zu untersuchen. Dasselbe gilt für eine Optimierung von aktiven und passiven Lawinenschutzmaßnahmen, die auf die örtlichen Gegebenheiten abzustimmen sind. Die angeführten Kosten und Preise verstehen sich als Mittelwerte auf Basis einschlägiger Untersuchungen und können für konkrete Situation im Anlassfall mit Angeboten validiert werden.

Die Ausgangssituation der Fallbeispiele #1 und #2 zusammen mit den resultierenden Ausfallkosten für Straße und Bahn (Abbildung 159) bzw. die Bahn alleine (Abbildung 161) sind in der Folge dargestellt. Basierend auf der Verkehrsbelastung werden in einem ersten Schritt die Ausfallkosten je Stunde Ausfall ermittelt. Für die Abschätzung der Ausfallkosten werden in einem zweiten Schritt die Ausfallsdauern nach Ereignisintensität und Jährlichkeit ermittelt. Die Summe von Ausfallsdauern mal Ausfallkosten je Stunde durch Jährlichkeit ergibt dann den mittleren jährlichen Erwartungswert der Gesamtausfallkosten ohne Schutzmaßnahmen (Nullvariante). Im Beispiel #2 werden neben den Ausfallkosten auch die Sachschäden je Ereignisintensität unter Berücksichtigung der Jährlichkeit miteinbezogen. Der Nutzen für Lawinenschutzmaßnahmen ergibt sich dann aus den vermiedenen Gesamtausfallkosten abzüglich Restrisiko. Diesem Nutzen können die jährlichen Kosten der Maßnahmenvarianten gegenübergestellt werden.

Die Ergebnisse des Vergleichs der jährlichen Kosten von aktiven und passiven Schutzmaßnahmen sowie des Nutzens in Form vermiedener Ausfallkosten für Beispiel #1 sind in Abbildung 160 dargestellt. Die Variante einer Lawinengalerie bietet einen hohen defensiven Schutz der Verkehrswege bei hohem Kostenaufwand und dafür vergleichsweise kleinem Restrisiko. Demensprechend ergibt sich ein Nutzen/Kosten Verhältnis auf Basis der jährlichen Kosten von 0,92 für die Straße und 0,84 für die Bahn. Die großflächige Lawinenverbauung im Anbruchgebiet bietet einen passiven, präventiven Schutz mit etwas höherem Restrisiko aber dafür geringeren Kosten und einem Nutzen/Kosten Verhältnis von 2,80 bzw. 1,41. Aktive Lawinenschutzmaßnahmen mit fest installierter Auslösevorrichtung bieten eine hohe Funktionssicherheit bei geringen Kosten, wobei ein effizienter Einsatz eine entsprechende Wartung und Management der Lawinenauslösung erfordert. Die sich ergebenden Kosten sind deutlich niedriger, dafür ist das Restrisiko etwas erhöht, woraus sich ein Nutzen/Kosten Verhältnis von 13,2 bzw. 6,6 ergibt. Die variable aktive Lawinenauslösung mit Helikopter bzw. UAV bietet eine mittlere Auslösesicherheit aber dafür eine erhöhte Flexibilität und geringere Kosten. Das sich ergebende Nutzen/Kosten Verhältnis liegt bei 32,0 für die Straße und 16,0 für die Schiene und ist unter Voraussetzung eines effizienten Managements am wirtschaftlichsten.

Die Ergebnisse von Beispiel #2 für die Liesgele – Lawine bei Mallnitz an der Tauernstrecke der ÖBB sind in Abbildung 162 dargestellt. Der Bau einer Lawinengalerie in Verlängerung des Tauerntunnels weist ein Nutzen/Kosten Verhältnis von 0,67 auf und ist auf Basis der angenommenen Zahlen wenig wirtschaftlich. Die Alternative einer großflächigen Anbruchs- und Verwehungsverbauung weist deutlich geringere Kosten auf und ergibt ein Nutzen/Kosten Verhältnis von 1,53. Aktive fest installierte Lawinenschutzmaßnahmen (Sprengmast/Gazex) in den beiden Anbruchgebieten mit zusätzlichem Schutzdamm ergeben ein Nutzen-Kosten Verhältnis von 5,4. Die variable Lawinenauslösung im Anlassfall wird zur Vermeidung von Schäden bereits bei geringeren Schneehöhen eingesetzt und liegt mit einem Nutzen/Kosten Verhältnis von 16-24 am besten, wobei im konkreten Fall auf den Schutz der Siedlungen besonders zu achten ist.



Eingangsdaten Bestandsstrecke (Beispiel):

- a) Straße (z.B. 15.000 DTV, 15% LKW)
Abgang → Personen & Sachschaden
Sperrung → Umweg, Einnahmenentfall
Sperrung + Abgang → Umweg, Einnahmen, Sachschaden
→ vereinfacht 1h Ausfall ~ z.B. 20.000 €
- b) Schiene 15.000 – 30.000 (z.B. 3.000 Pers./30 Züge; 15 Züge/1.000 t)
Abgang → Personen & Sachschaden
Sperrung → Umweg, Einnahmenentfall
Sperrung + Abgang → Umweg, Einnahmen, Sachschaden
→ vereinfacht 1h Ausfall ~ z.B. 10.000 €

Nullvariante Lawinenabschnitt		Straße:	Bahn:	
Mini	(h<2,0 m) p=1/a	Ausfall = 0 h	0 €/a	0 €/a
Klein	(h<3,0 m) p=1/5a	7,5 h (Betrieb)	30.000 €/a	15.000 €/a
mittel	(h<4,5 m) p=1/20a	50 h (Betrieb)	50.000 €/a	25.000 €/a
groß	(h<7,0 m) p=1/100a	3 Wochen	100.000 €/a	50.000 €/a
Extrem	(h<9,0 m) p=1/500a	6 Monate	175.000 €/a	88.000 €/a
Erwartungswert Ausfallkosten Straße/Bahn*		355.000 €/a	178.000 €/a	

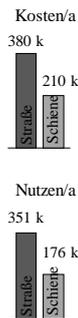
*Stark vereinfacht

Quelle: HOFFMANN, M. (2019)

Abbildung 159: Beispiel #1 – Beispielhafte Abschätzung der Ausfallkosten eines Streckenabschnittes von ÖBB und ASFINAG nach Lawinenereignis, Jährlichkeit und Ausfallsdauer (Teil 1)

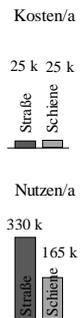
Passive Schutzmaßnahmen (Zins i~3%)*:

- a) Lawingalerie: defensiver Schutz Verkehrswege hoher baulicher Aufwand, hohe Sicherheit
Kosten: 1.500-2.000 €/m² Wirkdauer: 80-100 Jahre
Instands.: 1x/20-25 Jahre Annuität: 70-80 €/m²*a
z.B. Straße 1 x 9,5 m (2-spurig) x 500 m = 4.750 m²
mit Annuität* 80 €/m²*a = **380.000 €a Kosten**
z.B. Schiene 1 x 6,0 m (1-gleisig) x 500 m = 3.000 m²
mit Annuität** 70 €/m²*a = **210.000 €a Kosten**
Restrisiko: ~ 1% → vermiedene Ausfallkosten x 0,99
→ **Straße = 351.000 €a; Schiene = 176.000 €a Nutzen**
- Hohe Kosten, geringes Restrisiko (i.a. hochrang. Abschnitte)



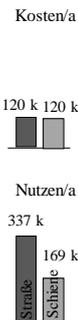
Aktive Schutzmaßnahmen (Zins i~3%)*:

- c) Lawinenauslösung fix (Gazex / Sprengmast) mit hoher Auslösesicherheit und mehreren Ladungen
Kosten: 2 x Zündrohr/Sprengmast Bau ~ 250.000 €
Wirkdauer: 20-25 Jahre; Wartung ca. 1,5% Bau p.a. einschließlich Sprengmittel Annuität: 20.000 - 25.000 €/a
Threshold z.B. 1,5 m → Ø 1-2 x Auslösen pro Jahr
z.B. Straße & Schiene = **25.000 €a Kosten**
Restrisiko: ~ 7% → vermiedene Ausfallkosten x 0,93
→ **Straße = 330.000 €a; Schiene = 165.000 €a Nutzen**
- deutlich geringere Kosten, etwas höheres Restrisiko
- Hohe Funktionssicherheit, Thema Wartung/Zugang



- b) Lawinerverbau: präventiv, großflächig, Veränderung Landschaftsbild im Anbruchgebiet

Kosten: 300.000 €/ha Wirkdauer: 50-100 Jahre
Instands.: 1-2% p.a. Annuität LCC: 15.000 €/ha*a
z.B. Straße & Schiene 200 x 400 m = 80.000 m² = 8 ha
mit Annuität* 15.000 €/ha*a = **120.000 €a Kosten**
Restrisiko: ~ 5% → vermiedene Ausfallkosten x 0,95
→ **Straße = 337.000 €a; Schiene = 169.000 €a Nutzen**



- Kostenunterschied zu Tunnel abhängig von Topographie
- Restrisiko in der Regel etwas erhöht gegenüber Tunnel
- Veränderung Landschaftsbild oberhalb Schutzwald

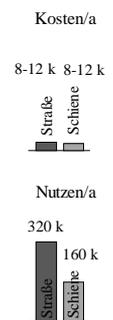
- d) Lawinenauslösung variabel (Heli/Drohne) mit mittlerer Auslösesicherheit und spezifischem Einsatz

Kosten: Flug 2h + Sprengmeister (Halbtag) 4h
Wirkdauer: 1x Einsatz; sowie Kosten Sprengmittel.
Einsatzkosten: 5.000 – 7.000 €/Einsatz (Heli),
2.500 – 5.000 €/Einsatz (Drohne)

Threshold z.B. 1,5 m → Ø 1-2 x Auslösen/Jahr (Heli/Drohne)
z.B. Straße & Schiene = **12.000 bzw. 8.000 €a Kosten**

Restrisiko: ~ 10% → vermiedene Ausfallkosten x 0,90
→ **Straße = 320.000 €a; Schiene = 160.000 €a Nutzen**

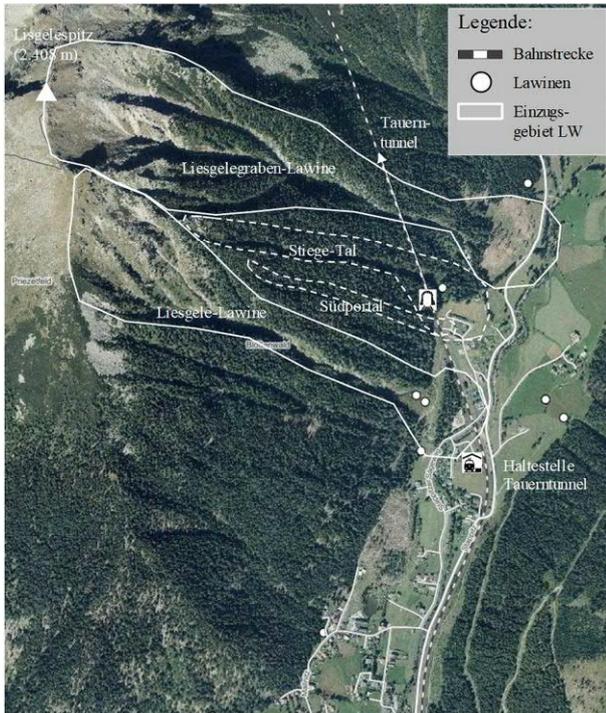
- Sehr günstig, effizientes Management, sonst erhöhtes Risiko



*Disclaimer: Die überschlägige Berechnung basiert auf stark vereinfachten Annahmen und sind für Investitionsentscheidungen anhand der konkreten Situation mit Angeboten zu validieren

**Quelle: HOFFMANN, M. (2019)

Abbildung 160: Beispiel #1 – Beispielhafter Vergleich der jährlichen Kosten von aktiven und passiven Schutzmaßnahmen sowie des Nutzens in Form vermiedener Ausfallkosten (Teil 2)



Eckdaten Analyse Tauernstrecke (2-gleisig):

Schiene ca. 15.000 – 30.000t (z.B. 3.000 Pers./30 Züge; 15 Züge/1.000 t)
 Abgang → Personen & Sachschaden
 Sperre → Umweg, Einnahmefall Schleuse, Sachschaden
 vereinfacht 1h Ausfall – z.B. 15.000 €/h für Betriebsausfälle

NULLVARIANTE ABSCHNITT:				Betrieb	Sachschaden
Mini	(h<2,0 m) p=1/a	Ausfall = 0 h		0 €/a	0,0/1
Klein	(h<3,0 m) p= 1/5a	7,5 Stunden (Betrieb)		22.500 €/a	0,0/5
mittel	(h<4,5 m) p=1/20a	50 Stunden (Betrieb)		37.500 €/a	0,1 Mio./20
groß	(h<7,0 m) p=1/100a	3 Wochen		75.600 €/a	1,0 Mio./100
Extrem	(h<9,0 m) p=1/500a	6 Monate		131.800 €/a	20,0 Mio./500
Erwartungswert Ausfallkosten Bahn (vereinfacht, geschätzt)				267.400 €/a	55.000 €/a

Abbildung 161: Beispiel #2 – Beispielhafte Abschätzung der Ausfallkosten des Streckenabschnittes Mallnitz-Tauernstrecke der ÖBB nach Lawineneignis, Jährlichkeit und Ausfallsdauer (Teil 1)

Passive Schutzmaßnahmen (Zins i~3%)*:

a) Lawingalerie: Verlängerung Eingang Tauernstrecke über den Lawinenbereich hinaus (einseitig halboffen)
 Kosten: 1.500 - 2.000 €/m² Wirkdauer: 80-100 Jahre
 z.B. Schiene 2 x 6,0 m (2-gleisig) x 500 m = 6.000 m²
 mit Annuität** 80 €/m²*a = **480.000 €a Kosten**
 Restrisiko: ~ 1% → vermiedene Ausfallkosten x 0,99
 → **Schiene = (267.400 + 55.000) x 0,99 = 322.400 €a Nutzen**

- Hohe Kosten, geringes Restrisiko für die Bahninfrastruktur und Betrieb (i.a. hochrang. Abschnitte)
 Bebauung im Umgebungsbereich bleibt ungeschützt

b) Anbruchs- und Verwehungsverbauung: präventiv, großflächig, Veränderung Landschaftsbild

Verwehung1 250 lfm x 500 €/lfm ~ 0,12 Mio. €
 Anbruch1 4,8 ha mit 3.300 lfm x 1000 €/lfm = 3,3 Mio. €
 Anbruch2 1,5 ha mit 720 lfm x 1000 €/lfm = 0,7 Mio. €
 + Sonstiges = **4,2 Mio. € Investition**
 Instds.: 1-2% p.a. Wirkdauer: 50-100 Jahre

z.B. Schiene Annuität* = **200.000 €a Kosten**

Restrisiko: ~ 5% → vermiedene Ausfallkosten x 0,95
 → **Schiene = 306.000 €a Nutzen**

- Restrisiko in der Regel etwas erhöht gegenüber Tunnel
 - Veränderung Landschaftsbild oberhalb Schutzwald

*Disclaimer: Die überschlägige Berechnung basiert auf vereinfachten Annahmen bzw. der Studie von ILLMER, D. et al. (2015) und sind anhand der konkreten Situation mit Angeboten zu validieren

Aktive Schutzmaßnahmen (Zins i~3%)*:

c) Lawinenauslösung fix (Gazex / Sprengmast) mit Lawinenschutzdamm um ca. 800.000 € (50 Jahre)
 Kosten: 2 x Zündrohr/Sprengmast Bau ~ 250.000 €
 Wirkdauer: 20-25 Jahre; Wartung ca. 1,5% Bau p.a. einschließlich Sprengmittel Annuität: 20.000 - 25.000 €a
 Threshold z.B. 1,0 m → Ø 2,5 x Auslösen pro Jahr
 z.B. Schiene = 25.000 €a + 31.000 €a (Damm) = **56.000 €a Kosten**

Restrisiko: ~ 7% → vermiedene Ausfallkosten x 0,93
 → **Schiene = 300.000 €a Nutzen**

- deutlich geringere Kosten, etwas höheres Restrisiko

d) Lawinenauslösung variabel (Heli/Drohne) mit mittlerer Auslösesicherheit und spezifischem Einsatz

Kosten: Flug 2h + Sprengmeister (Halbtage) 4h
 Wirkdauer: 1x Einsatz; 2x Sprengen mit Kosten Sprengmittel
 Einsatzkosten: 6.000 – 8.000 € Einsatz (Heli), 4.000 – 6.000 € Einsatz (Drohne)

Threshold z.B. 1,0 m → Ø 2,5 x Auslösen x 2 Anbruchgebiete
 z.B. Schiene = **2,5x7.000 = 17.500 €a Kosten (Heli)**
2,5x5.000 = 12.500 €a Kosten (Drohne)

Restrisiko: ~ 10% → vermiedene Ausfallkosten x 0,90
 → **Schiene = 287.000 €a Nutzen**

- Sehr günstig, effizientes Management erforderlich und geringer Threshold (1,0 m) sonst erhöhtes Risiko

**Quelle: HOFFMANN, M. (2019)

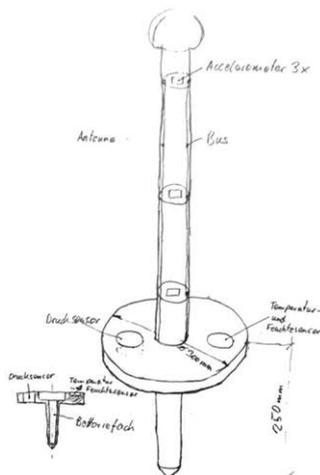
Abbildung 162: Beispiel #2 – Beispielhafter Vergleich der jährlichen Kosten von aktiven und passiven Schutzmaßnahmen sowie des Nutzens in Form vermiedener Ausfallkosten und Sachschäden (Teil 2)

6.6 Konzept Sensornetzwerk

Wie anhand des entwickelten Simulationsmodells und Lebenszykluskostenansatzes gezeigt, reichen bei Begrenzung der kritischen Schneehöhe durch präventive aktive Lawinenschutzmaßnahmen laufende Aufzeichnungen von Wetterstationen aus. Dennoch kann es für die Verbesserung der Rechenmodelle bzw. ein besseres Verständnis des Lawinenmechanismus sinnvoll sein, entsprechende Messungen von Aufbau, Dichte, Druck, Wassergehalt etc. der Schneedecke zu gewinnen. Der Nachteil der herkömmlichen Erfassungsmethoden (Kap. 6.5.2) ist dabei insbesondere in der punktuellen Charakteristik der Messungen sowie der begrenzten Zugänglichkeit bei hoher Lawinengefahr zu sehen. Eine periodische flächige Aufnahme der Schneedecke z.B. mittels UAS erlaubt zwar eine Rückrechnung der Schneedeckendicke, kann aber nur begrenzt Aufschluss über die Verhältnisse im inneren der Schneedecke geben.

Im Forschungsprojekt RISKMON wurde daher auf Basis umfangreicher Recherchen das Konzept eines innovativen Sensornetzwerkes mit Ausbringung und Datenauslesung durch UAV entwickelt. Die Anforderungen und eine erste Skizze dieses Schneeklinometers sind in Abbildung 163 zusammengefasst. Abbildung 164 zeigt eine Modellskizze und Anordnung der Sensorik, den Aufbau des Messnetzes sowie die Ausbringung der einzelnen Schneeklinometer mittels UAV. Da Schnee eine große Isolationswirkung hat und die Länge des Sensorstabes begrenzt ist, kann das Messnetz bei anhaltenden Schneefällen in mehreren Lagen ausgebracht werden. Bei der Auswahl der elektronischen Komponenten sind gleichermaßen Preis und Dauerhaftigkeit sowie geringer Energieverbrauch wesentlich. Abbildung 165 zeigt eine Vorauswahl grundsätzlich geeigneter elektronischer Komponenten. Die Fertigung von kleinen Stückzahlen für den Test und die Optimierung der Schneeklinometer kann mittels 3D – Druck erfolgen, was die Kosten für ein Pilotprojekt im Rahmen halten würde. Da eine Umsetzung des entwickelten Konzeptes allerdings den finanziellen und zeitlichen Rahmen von RISKMON sprengen würde, empfiehlt sich bei Bedarf eine Umsetzung im Rahmen eines eigenen Forschungsprojektes zu realisieren.

Erste Skizzen Schneeklinometer



Schwerpunkt unten (Batterie) für Standsicherheit, wasserdicht, biegesteif, Produktion Prototyp über 3D – Druck,

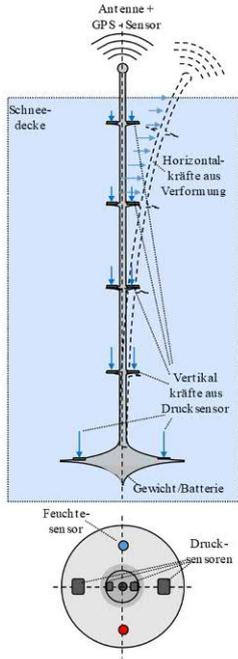
Quelle: STRAUSS, A. & JELINEK, M. (2018)

Anforderungen/Vorgaben für die Entwicklung:

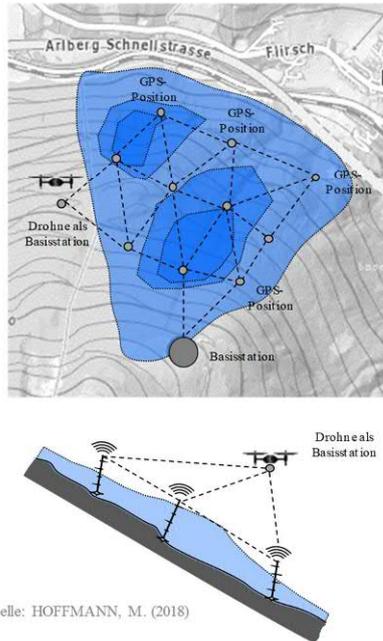
- Sensoren sollen Drohnen in Lawinhänge und Schneefelder ausgebracht werden können und werden entsprechend der Fallhöhe an der Oberfläche oder in der Schneedecke positioniert
- Sensoren sollen in ihrer Lage x,y,z lokalisierbar sein, Veränderung in der Lage sind zu erwarten, weiters sollen die Schneetemperatur, Feuchte, eventuell auch Dichte gemessen werden
- Sensoren sollen in ihrer Lage x,y,z lokalisierbar sein, Veränderung in der Lage sind zu erwarten, weiters sollen Schneetemperatur, Feuchte, Dichte, Höhe und Schichtung gemessen werden
- Die Sensorinformationen sollen z.B. mittels Erfassungseinheit an der Drohne ausgelesen werden können – in kritischen Perioden 1 bis 2 mal pro Tag ansonsten etwa 1 mal pro Woche
- Alternativ sollen die Sensorinformationen in frei konfigurierbaren Intervallen an eine Bodenstation übermittelt werden (z.B. Weiterleitung über Sensornetzwerk)
- Anzahl der Sensoren zur Erfassung der Schneedeckeneigenschaften abhängig von Einsatzzweck für die Kalibration von Lawinenmodellen oder laufender Überwachung
- Antennenstabs fungiert auch als Kraftmesser für horizontale Schneelasten und zusammen mit GPS als Detektor für den Lawinenabgang
- Der Antennenstabs dient ebenfalls der Signalübertragung und ist für eine Länge von 1,5-2,0 m konzipiert, bei großen Schneereignissen könnte auch eine mehrmalige Ausbringung erfolgen
- Neben robuster Ausführung, standardisierten Datenübertragung und automatisierten Auswertung sind die Kosten je Sensor möglichst gering zu halten (Ausbringung größere Anzahl, Verlust, Diebstahl)

Abbildung 163: Sensornetzwerk #1 – Konzeptentwurf, Skizzen und Anforderungen

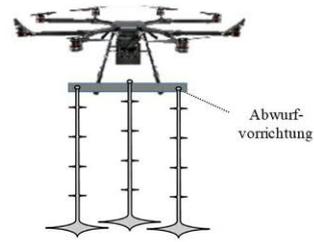
Mobiler Schneeklinometer



Aufbau eines Messnetzes (Lageplan)



Transport und Abwurf der Sensoren



- Die Sensorik basiert auf existierenden Komponenten – das Gehäuse ist über 3D-Druck herstellbar
- Das Schneeklinometer beinhaltet GPS, Drucksensoren, Temperatur- und Feuchtesensor, Batterie & Sendeeinheit etc.
- Die Stange fungiert als Messstab (Druck, Abgang) und Antenne, da die Schneedecke stark abschirmt
- Über das Messnetz können die Daten laufend zu einer Basisstation (fix) oder einer Drohne übertragen werden
- Ein Lawinenabgang ist unmittelbar detektierbar – Basis für eine statistische Rückrechnung der Lawinengefahr
- Am Ende des Winters sind die kostengünstigen Sensoren leicht auffindbar (GPS) und einzusammeln

Abbildung 164: Sensornetzwerk #2 – Aufbau, Sensorik, Messnetz und Ausbringung

Komponenten Schneeklinometer:

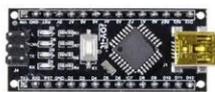
Kommunikationsschnittstelle / Controller:

Pycom Lopy4 Anbindung über I²C
LoRa Kommunikation (868MHz sollte durch Schneedecke möglich sein im Mesh- Betrieb)
WiFi / Bluetooth / Sigfox
2 x UART, SPI, 2 x I2C, I2S, micro SD card
Analog channels: 8_12 bit ADCs
Timers: 4_16 bit with PWM and input capture / RTC
Input: 3.3V 5.5V
WiFi: 12mA in active mode, 5uA in standby
LoRa: 15mA in active mode, 1-uA in standby



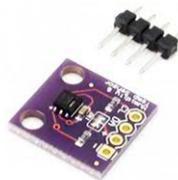
Opt.: Controller / Auswertung Sensorik:

Atmel Atmega 328
(Damit kann die Kommunikationsschnittstelle in Standby geschaltet werden -Energiebedarf) ob ein ausreichender Vorteil gegeben ist oder direkt mit dem LOPY4 gearbeitet wird ist zu klären



Temperatur / Feuchtigkeitsmessung: SHT21

GY-213V-SHT21 I2C Humidity & Temperature Sensor Module
Anbindung über I²C
200-330µA / 0.14µA sleep



Quelle: JELINEK, M. (2018)

Druckmessung:

- über Luft / Umgebungsdruck in geschlossener Kammer (im Gehäuse integriert)
NT: Genauigkeit / Abgleich / Messbereich
- resistive Druckplatten
NT: Gehäuse / Energiebedarf
- über Flüssigkeitsmedium + Gehäuse
→Piezodrucksensor
DLH-L10D Anbindung über I²C
1,5-2mA / 100-250µA idle



Inklinometer:

- 3achsige muRata Accelerometer SCA3100 +2g XYZ- Messung
Anbindung über SPI
- 1achsige muRata Inklinometer SCA103T (3er Gruppen)
+30° in 0,001°Schritten
Anbindung über SPI
3-5mA/ 0,12mA idle



Batterie: LiPO (18,5 x 65,3 mm)

2,5-3,6V 3200mAh
Entladebetrieb bis -20°C
Geringe Selbstentladung
Integrierte BMS
Stahltank (Stabilität)



Abbildung 165: Sensornetzwerk #3 – Elektronische Komponenten Schneeklinometer

6.7 Vergleich und SWOT-Analyse

Eine systematische Evaluation basiert auf Zielsetzungen, Kriterien und Indikatoren für eine qualitative oder quantitative Analyse. Als Basis für Entscheidungen ist zudem ein Vergleich mit Standards, bereits erzielten Resultaten oder Handlungsalternativen im Verhältnis zu den erforderlichen bzw. eingesetzten Ressourcen erforderlich. Die für RISKMON gewählte SWOT – Analyse dient dazu in den Handlungsfelder Stärken auszubauen, Schwächen zu minimieren, Chancen zu nutzen und mögliche Bedrohungen rechtzeitig zu erkennen. Die SWOT – Analyse zum Einsatz **mobiler Sensorik bei Naturgefahren** fasst die Ergebnisse von RISKMON im Vergleich zu den bisherigen Standards und Methoden übersichtlich zusammen (Tabelle 61).

Aus Sicht von RISKMON liegt die größte Stärke bei Naturgefahren in der quantitativen und qualitativen Erfassung des Zustands von Schutzanlagen sowie Ausmaß von Schäden und Gefährdungslagen sowie dem präventiven Einsatz zu Aufklärung und Gefahrenminimierung (z.B. Sprengung) durch UAS. Im Gegensatz zu Bauwerken ist das Konzept mit wesentlichen Algorithmen und Werkzeugen für eine Auswertung und Maßnahmenplanung sowie Optimierung weitgehend vorhanden und bringt der Einsatz von UAS-Lösungen unmittelbar Flexibilität und Vorteile. Die größte Schwäche liegt in der bestehenden empirischen Herangehensweise ohne Möglichkeit eines systematischen Asset Management und Optimierung der Lebenszykluskosten. Die größte Chance für den Betreiber liegt darin, sich nicht von zufällig auftretenden Extremereignissen leiten zu lassen, sondern in entsprechend objektive Entscheidungsinstrumente zu investieren. Die größten Risiken bestehen in einer konservativen Grundhaltung im Anwendungsfeld, was die Kommunikation vor besondere Herausforderungen stellt.

Tabelle 61: SWOT – Analyse Einsatz mobiler Sensorik bei Naturgefahren

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Nachvollziehbare Ergebnisse durch schnelle Aufklärung und quantitative Erfassung mittels UAS unmittelbar erzielbar • Schadenserfassung an Schutzbauwerken, Erfassung von Gefährdungslagen und Maßnahmenerfolg mittels UAS unmittelbar umsetzbar • Konkrete Anwendungsbeispiele mit Formaten und Instrumenten der Datenauswertung vorhanden • Verbesserte Zustandserfassung und Dokumentation für Gefahrenabwehr und Risikomanagement • Lebenszykluskostenmodell für Naturgefahren und Maßnahmenvergleich (aktiv, passiv) entwickelt • Klar strukturiertes Datenmanagement in Bestandsystemen für rasche Verfügbarkeit gezeigt • Maximierung der Sicherheit und Verfügbarkeit der Infrastruktureinrichtungen möglich • Effizienzsteigerung durch Optimierung des Mitteleinsatzes, Verfügbarkeit und Risikominimierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Zusätzliche Behördenwege insbesondere für präventive Maßnahmen (Lawinsprengung) erforderlich • Anpassung bzw. Aufnahme in Risikomanagement sowie Umsetzung neuer Ansätze in Zustandserfassung und Gefahrenabwehr begleitend sinnvoll • Integration und Akzeptanz neuer Instrumente bereits vorhanden – für Anwendung der konzipierten Modelle ist zum Teil noch Forschung & Entwicklung notwendig • UAS-gestützter Lawineneinsatz setzt umfassende Aviation- rechtliche und UAS-Expertise voraus • Expertenausbildung intern für Umsetzung der Ansätze sowie Kommunikation nach außen ist zu empfehlen • Gegebenenfalls Investitionen in Software, IT -Systeme und Schulungen bei Betreibern nötig
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung der Erfassung, von Interventionen und Managementstrategien bei Naturgefahren • Moderne Erfassungsmethoden und modernes Risikomanagement • Digitalisierung, Umsetzung neue Ansätze und Kommunikation intern/extern 	<ul style="list-style-type: none"> • Konservative Haltung praktischer Anwender sowie Management/Kommunikation von Restrisiken • Unzureichende Umsetzung und Kommunikation der erforderlichen Ansätze und Eintritt Ereignisse

6.8 Ergebnisse und Empfehlungen

Das Forschungsprojekt RISKMON von BMVIT, ÖBB, ASFINAG und FFG erforscht die Konzeption, Umsetzung und Integration teilautomatisierter Inspektionen mittels unbemannter Luftfahrzeugsysteme und Sensorik (UAS). Im **Einsatzbereich Naturgefahren** geht es um die Zustandserfassung, Maßnahmenvorbereitung und Einsatz (Sprengung) vor/während/nach Naturgefahren /Mure/Lawinen mit Einbindung, LCC – Analyse und Empfehlung. Dementsprechend bauen die Ergebnisse und Empfehlungen auf die bisherige Anwendung sowie die Forschungsergebnisse von RISKMON auf und können wie folgt zusammengefasst werden:

- **Strategieentwicklung:** Aufbauend auf Einsatzerfahrungen schrittweise Entwicklung und Konkretisierung der Digitalisierung und Managementstrategie von Naturgefahren zur Optimierung von Streckenverfügbarkeit und Lebenszykluskosten unter Berücksichtigung quantitativ erfasster Risiken in einer Arbeitsgruppe mit internen/externen Experten
- **Forschung und Entwicklung:** Bestehende Ansätze bei Naturgefahren setzen auf empirische Ansätze, hohe Investitionen in passive Schutzmaßnahmen sowie aktive Maßnahmen im Anlassfall. Mit dem Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugsystemen steht eine neue Technologie zur Verfügung mit welcher bei schrittweiser Implementierung eine Entwicklung einhergehen wird, welche wesentliche Verbesserungen bei Streckenverfügbarkeit und Lebenszykluskosten bringen kann. Mit der hochgenauen Erfassung und einer quantitativen Risikooptimierung sind wesentliche Entwicklungen schrittweise möglich, deren Voraussetzungen sind:
 - Quantitative Erfassung von Gefahrenbereichen, Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß sowie Wirkung und Kosten von Maßnahmen für das Lebenszyklusmodell
 - Simulationsrechnungen Naturgefahren für die Standardfälle nach Gefahrenlage
 - Konzeption und Umsetzung Lebenszyklus- und Managementansatz sowie Software
 - Entwicklung eines Schulungsprogramms für Digitalisierung und Risikomanagement
- **Schulung und Weiterbildung:** Die effiziente Umsetzung der entwickelten Strategien und Anwendung erfordern die Bewahrung von bestehendem Wissen und darauf aufbauend Know-How-Entwicklung für die neuen Methoden und Anwendungen als Basis für eine effiziente Umsetzung im Unternehmen mit empfohlener
 - Definition einer zentralen Koordinierungsstelle
 - Definition von Ansprechpartnern in den einzelnen Fachbereichen und Auswahl diesbezüglich motivierter Mitarbeiter
 - Schulungen und Training der Mitarbeiter zum Einsatz der neuen Methoden
 - Definition von Schnittstellen und Handlungsanleitung mit Kommissionen und Expertengruppen vor Ort für die spezifische Ansprache der Gefahrenbereiche
 - Prozessmanagement und Begleitung der Umsetzung
 - Schulung in Analyse der Sensordaten sowie Einsatz UAS in Aufklärung und Gefahrenabwehr sowie Interpretation und Umsetzung der Empfehlungen aus dem Managementtool
- **Praktische Umsetzung:** Das Ziel in der praktischen Umsetzung besteht in der schrittweisen Implementierung der neuen Erfassungsmethoden und in der weitgehenden Standardisierung der Prozesse mit Umsetzung aller wesentlichen Tätigkeiten in einfach zu nutzenden Softwaretools für das Management der Naturgefahren. Empfohlene Schritte sind
 - Kombination praktischer Anwendungen, deren schrittweise Entwicklung und der stufenweisen Integration
 - Die Erfassung von Gefahrenbereichen und Bauwerkszustand an der Strecke
 - Entwicklung und Umsetzung quantitativer Ansätze im Bereich Naturgefahren
 - Organisationsentwicklung und Change Prozess zur Akzeptanzsteigerung
 - Entwicklung und Implementierung von Softwaretools für die praktische Anwendung

- **Kommunikation:** Wesentliche Voraussetzung jeder erfolgreichen Umsetzung ist eine klare Kommunikation der Zielsetzungen, der zu erwartenden (Rest-)Risiken und der Ergebnisse
 - Vorteile und Potenziale der neuen Methoden
 - Unternehmensstrategie und erwartete Ergebnisse generell
 - Umsetzungsplan, Anforderungen und Kommunikationsstrategie intern
 - Kommunikation von Strategien, Etappenzielen und Ergebnissen intern/extern

7 Zustandserfassung Strecke

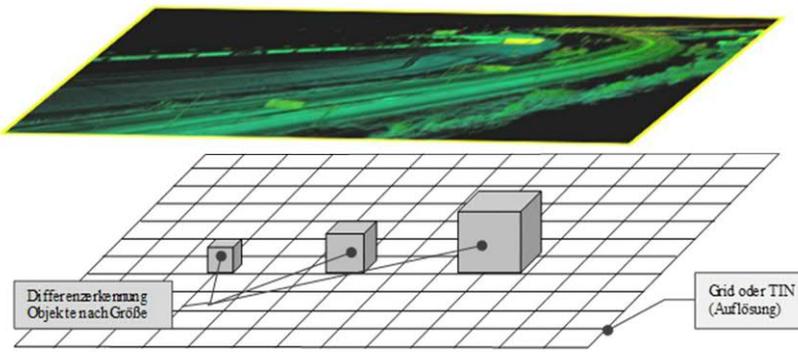
7.1 Konzeption Zustandserfassung

Ausgehend von den in Kap. 2.2.3 dargestellten Standards der Bestands- und Zustandserfassung der Strecke soll in einem nächsten Schritt eine umfassende Zustandserhebung mittels mobiler Sensorik konzipiert und umgesetzt werden. Die Zielsetzung von RISKMON besteht dabei in der Konzeption und Anwendung teilautomatisierter Erfassung und Umsetzung der Streckeninspektion im Anlassfall sowie im Rahmen periodischer Erfassungen und Vergleich zu bisherigen Herangehensweisen. Dazu sind folgende Aufgaben zu erfüllen:

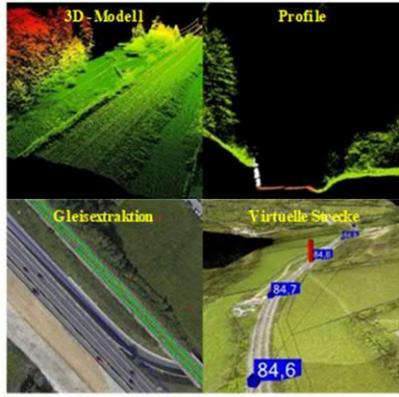
- Zustandserfassung mit UAS von Strecken der ÖBB und ASFINAG (je ca. 3 km)
- Visuelle Analyse und Detektion streckenfremder Objekte/Änderung durch Operator und Analysten (LIVE)
- Umsetzung Detektion von Veränderungen (→ künstl. Objekte, mit Differenzmapping TIN)
- Erfassen von Handlungsbedarf (→ Bewuchs, Rutschungen, bauliche Änderungen, Schäden)
- Bestandserfassung mit GIS – Einbindung (Orthofotos, Geländemodelle etc.)
- Ermittlung der Wiederholgenauigkeit zwischen Befliegungen und Vergleich mit konventioneller Inspektion

Die Streckenerfassung mittels UAS liefert ein ganzheitliches Bild (live) und schafft zusammen mit einem Viewer die Möglichkeit der Inspektion anhand dreidimensionaler Darstellungen. Auf Basis fotogrammetrischer Auswertungen und Entzerrung können zeitnahe Aufnahmen und Orthofotos sowie Geländemodelle der Strecke für die Bestandsdokumentation erstellt werden. Die Überlagerung mit den Plänen des Anlagenbestandes (z.B. DOXIS, ANDOS) und Vergleich mit erfassten/nicht erfassten Anlagen. Zuverlässige Inspektion und Unterstützung bei der Detektion von Änderungen und Handlungsbedarf an der Strecke (Vegetation, Rutschungen, fremde Objekte). Für eine erfolgreiche Umsetzung ist die (teil-)automatisierte Erkennung von Änderungen, Auswertung Analyse, Einbindung erfasster Daten (Geostore, Bereinigung, Sicherung, Viewer, Auswertung) wesentlich. Der potenzielle Nutzen liegt in der systematischen dreidimensionalen Erfassung und messtechnischen Auswertungen von Bestandsstrecken, einer Detektion von Änderungen durch Differenzmapping/Operator sowie Überlagerung mit GIS/CAD-Bestand.

2x Befliegen (Photogrammetrie, Laserscan) mit Differenzmapping



Weitere Analysemöglichkeiten



vgl. Bilder: IQSOFT

- Erkennung von Auffälligkeiten im LIVE – Modus bei der Befliegung der Strecke (Operator)
- Erkennung von Auffälligkeiten aus Differenzmapping hinzugefügter Objekte (nach Größe) mit Prozessierung und Anzeige für die Detailanalyse
- Weitere Verarbeitung LIDAR/Photogrammetrie mit GIS – Einbindung → Orthofotos, Profilextraktion Geländemodelle, virtuelle Strecke, Overlay Planungsdaten und Vergleich
- Viewer und Anforderungen Expertenarbeitsplatz für Bearbeitung & virtuelle Befliegung der Strecke

Abbildung 166: Konzeption der Streckeninspektion mittels UAS und Differenzmapping mittels Orthofotos sowie eingebrachten Objekten mit (teil-)automatisierter Analyse

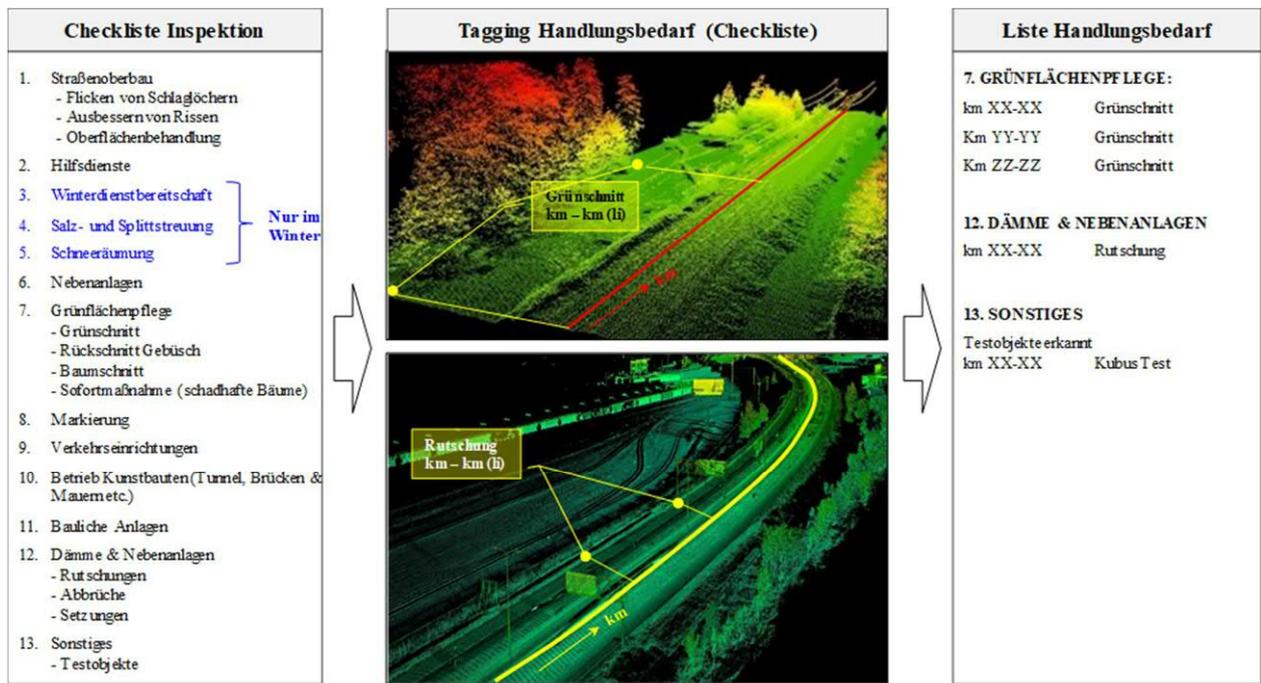


Abbildung 167: Konzeption der Streckeninspektion mittels UAS und Orthofotos bzw. Multispektralanalyse und Markierung des Handlungsbedarfes in ausgewählten Abschnitten mittels Checklisten

7.2 Auswahl Einsatzgebiet

7.2.1 Ziel der Auswahl

Es sollten jene Objekte entlang der jeweiligen Strecken definiert werden, deren Erfassung Vorteile für die Mitarbeiter der Auftraggeber (AG) in ihren Aufgabenbereich bietet. Zusätzlich sollten Streckenabschnitte gefunden werden, deren Aufnahme skalierbar auf weitere Anwendungen schließen lässt und den Forschungscharakter erfüllt. Auch im Teilbereich Streckeninspektion wurden Brainstorming-Workshops und Expertenbefragungen durchgeführt um die Ziele des Projektes mit den Fachexperten der AG abzustimmen.

7.2.2 Brainstorming-Workshops

Zur Planung einer Erfassung eines bestimmten Streckenabschnittes, sollten die Ideen der Fachexperten der AG eingeholt werden. In 3 Terminen wurden jene Objekte definiert, die entlang der Strecke für eine Erfassung interessant wären. In Tabelle 62 ist eine Übersicht über die durchgeführten Workshops zusammengestellt.

Tabelle 62: Terminübersicht im Teilbereich Streckeninspektion

Datum	Ziel des Termins
28.11.2017	Projekt Kick-off Meeting
13.4.2018	Konkretisierung von Anwendungen und einbringen neuer Ideen
24.5.2018	Definition von konkreten Anwendungen und Vorbereitung der Objektauswahl

Die innerhalb der Workshops definierten Ansprechpartner sind in Tabelle 63 aufgelistet. Aufgabe der Ansprechpartner ist als Kommunikationsschnittstelle zwischen den internen Stellen der AG und dem Projektteam zu fungieren und die erste Ansprechstelle für fachliche Fragen zu bilden.

Tabelle 63: Ansprechpartner im Teilbereich Streckeninspektion

Kategorie	ASFINAG	ÖBB
Streckenerfassung Gleis	-	Jakob Raffel
Streckenerfassung Autobahn	Christian Albrecht	-

Nachfolgend eine Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Workshops im Teilbereich Streckeninspektion.

Streckeninspektion einer Autobahn:

- Datenschutz beachten
- Regelmäßige Befliegung für aktuelle Daten und weniger Streckensperren
- Saisonale Prioritäten, wie z.B.: Eiszapfenbildung

- Möglichst viele Objekte entlang der Teststrecke; Rastplatz entlang der Teststrecke wäre von Vorteil
- Neubaustrecke ist möglicherweise gar nicht der optimale Fall (keine Schäden, nicht wirklich Inspektion)
- Inspektion von Überkopfwegweiser (ist beim R2F Projekt rausgefallen)
- Erfassung neben der Güterumfahrung St. Pölten als Kombination von ÖBB und ASFINAG Strecke auch denkbar
- Datenfluss in das GIS-System der ASFINAG wichtig
- Prioritäten bei der Erfassung: aktuelle Vermessungsdaten gewinnen, Inventarisierung, Fahrbahnzustand (Forschungsthema), Erfassung von Einbauten, Orthofotos

Streckeninspektion von Gleisen:

- Breite der Aufnahme: 50 Meter von der Strecke vollkommen ausreichend (auch Gebäude neben der Strecke erreichbar)
- Einfluss von Wetterbedingungen bei der Detektion von Veränderungen
- Bessere Arbeitssicherheit und schnellere Streckenfreigabe
- Genaue Vermessung bzw. Inventarisierung von Objekten und Gebäuden
- Inspektionen in schwierig zugänglichen Bereichen und der Veränderung von Oberleitungsmasten
- Hohlräume in Tunnelwänden oder Einbauten unterhalb von Gleisen
- Befliegung als Ergänzung zum momentan eingesetzten Messzug
- Definition wer intern die Genehmigung für Drohnenflüge erteilt; Rechtliche Bestimmung in der Nähe von Zügen, Gleisen und Oberleitungen
- Bahnhofsgebäude mit Schäden bereits bekannt und gut zugänglich

7.2.3 Expertenbefragung

In Tabelle 64 ist ein Ausschnitt aus der Expertenbefragung zum Teilbereich Streckeninspektion dargestellt. In der Auswertung der Expertenbefragung wurden die genannten Objekte mit Punkten von 1 bis 5 bewertet. Die Wertung setzt sich aus der Anzahl der möglichen Anwendungen, die im Rahmen der Erfassung durchführbar wären, der forschungsbezogenen Relevanz und der Prioritäten der Fachexperten der AG zusammen.

Tabelle 64: Ausschnitt aus dem Ergebnis der Expertenbefragung für den Teilbereich Streckeninspektion

Beschreibung der Anwendung	Machbarkeit	Standardanwendung	R2F Durchführung	A01 West Autobahn Matzleinsdorf Pöchlarn-Bereich Rastplatz Ornding	Güterzugsumfahrung Bereich St. Pölten (GZU)
Eingereicht von				Albrecht	Raffel
Firma				ASFINAG	ÖBB
Streckentyp				Autobahn	Bahnstrecke
Wertung				5	5
Erfassen, Vermessen und inspizieren von Lärmschutzwänden	ja	ja		ja	ja
Erfassen, Vermessen und inspizieren von Leitschienen	ja	ja		ja	

Abstandsvermessung Fahrbahn zu Einbauten, Schutzstreifen etc.	ja	ja		ja	
Fahrbahnzustand erfassen (Risse, Fugen, Markierungen)	möglicherweise	nein		ja	
Fahrbahnzustand erfassen (Spurrillen)	möglicherweise	nein			
Abstandsmessung zu Bewuchs, Objekten, Verkehrsflächen etc.	ja	ja			
Vitalität des Bewuchses	ja	ja		ja	
Abstand zu Gebäuden	ja	ja		ja	
IST-Bestandsdokumentation	ja	ja		ja	ja
Inventarisieren der Parkplätze inkl. Einrichtungen	ja	ja		ja	
Geländeerfassung: Feststellen von Veränderungen bei nochmaligem Befliegen	ja	ja		ja	ja
Erfassung und Überwachung eines Streckenabschnittes: Feststellen von Veränderungen bei nochmaligem Befliegen	ja	ja		ja	ja
Vermessung Lichtraumprofil (Objektlokalisierung, Signal-sichtbarkeit ect.) über die erste Linie hinaus	ja	ja			ja
Sichtbare Schäden, Brandspuren, Verschmutzungen	ja	ja			ja
Schiefstellungen, Sitz bspw. der Klemmen an Oberleitungen	ja	nein			
Korrosion	ja	ja			
Erhöhte Übergangswiderstände an Oberleitungen	möglicherweise	nein			
Wärmestellen	ja	nein			
Erhöhte Sprühercheinungen (Korona) an Oberleitungen	ja	ja			
Sichtbare Litzenbrüche, weg-stehende Litzen, Korb-bildungen an Oberleitungen	ja	nein			ja
Durchgangsdifferenzen von Oberleitungen	ja	nein			
Fremdkörper auf Seilen	ja	ja			ja
offensichtliche Schäden, welche die Standfestigkeit gefährden	ja	ja			ja
Verdrehung der Eckstiehl und/oder Ausleger	ja	nein			
Beschilderung	ja	ja			
Inspektion von Überkopfwegweisern	ja	ja			
Wildschutzzaun	ja	ja		ja	
Gewässerschutzanlagen	ja	ja		ja	
Beleuchtungskörper	ja	ja		ja	
Brückenbauwerke	ja	ja			
Sonstige Gebäude	ja	ja			ja
Begleitwege	ja	ja			ja

7.2.4 Ergebnis und Beschluss

Die in Tabelle 65 aufgelisteten Teststellungen wurden im Steuerungsteammeeting vom 6.6.2018 beschlossen.

Tabelle 65: Beschlossene Teststellungen im Teilbereich Streckeninspektion

Kat.	Angebot	Teilbereich	Vorschlag	Objekttyp	Unternehmen
C	1. Strecke ASFINAG (bis zu 3 km)	Streckeninspektion	A01 West Autobahn Matzleinsdorf Pöchlarn-Bereich Rastplatz Ornding	Strecke Straße	ASFINAG
C	2. Strecke ÖBB (bis zu 3 km)	Streckeninspektion	Güterzugumfahrung Bereich St.Pölten (GZU)	Strecke Schiene	ÖBB

7.3 Einsatzplanung Strecke

7.3.1 Streckeninspektion Pöchlarn und Rastplatz (ASFINAG)

Ziel der Anwendung es, unterschiedliche Bereiche, Bauwerke und Anlagen entlang eines Autobahnabschnittes zu erfassen, um einerseits eine oberflächigere Zustandserfassung und Bestandsaufnahme zu ermöglichen und andererseits Veränderungen im Streckenbereich festzustellen. Für die Anwendung wurde das Autobahnteilstück auf der A1 bei Pöchlarn ausgewählt.

Das Fluggebiet war Teil der Autobahn weshalb eine Betretungserlaubnis beantragt wurde und durch ASFINAG in Kombination mit Sanierungsarbeiten eine Sperre des Pannestreifens, sowie der ersten Fahrspur eingerichtet wurde.

Für die Flugplanung wurden folgende Parameter vorgesehen:

- Flugparameter:
 - Fahrbahnbegutachtung:
 - § Flugsteuerung: Wegpunktflug Linie
 - § Flughöhe: 10m
 - § Überlappung: 75% längs
 - § Fluggeschwindigkeit: 1m/s
 - Übersicht Objektpositionierung:
 - § Flugsteuerung: Wegpunktflug Linie
 - § Flughöhe: 70m
 - § Überlappung: 90% / 70%
 - § Fluggeschwindigkeit: 4,5m/s
 - Orthofoto Rastplatz:
 - § Flugsteuerung: Wegpunktflug Grid
 - § Flughöhe: 70m
 - § Überlappung: 80% / 70%
 - § Fluggeschwindigkeit: 4,5m/s
 - Detailaufnahme Gebäude Rastplatz:
 - § Flugsteuerung: Wegpunktflug Doublegrid
 - § Flughöhe: 30m
 - § Überlappung: 70% / 70%
 - § Fluggeschwindigkeit: 3m/s

Die Datenerfassung erfolgte am 08.05.2019 mit einer Dauer von insgesamt rund 8 Stunden (inkl. Rüstzeiten) bei trockenen und sonnigen Witterungsverhältnissen.



Abbildung 168: Flugplanung Orthofoto Rastplatz Pöchlarn

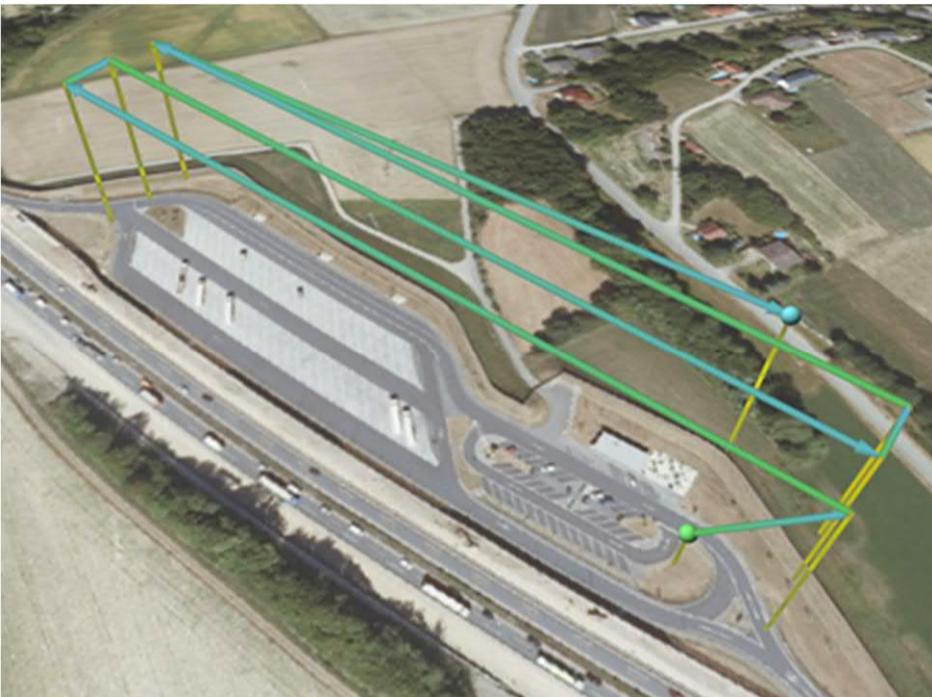


Abbildung 169: Flugplanung Detailaufnahme Gebäude Rastplatz Pöchlarn



Abbildung 170: Impressionen von der Datenerfassung Autobahnabschnitt A1 bei Pöchlarn

7.3.2 Streckeninspektion St. Pölten (ÖBB)

Ziel der Anwendung es, unterschiedliche Bereiche, Bauwerke und Anlagen entlang eines Bahnabschnittes zu erfassen, um einerseits eine oberflächigere Zustandserfassung und Bestandsaufnahme zu ermöglichen und andererseits Veränderungen im Streckenbereich festzustellen. Für die Anwendung wurde die Güterzugsumfahrung (GZU) St. Pölten ausgewählt.

Das Fluggebiet war Teil eines abgesperrten ÖBB-Geländes weshalb bei den Einsätzen jeweils eine Aufsichts- und Sicherheitsperson die Einsätze begleitet hat. Die Einsätze wurden zum Teil auch terminlich so gewählt, dass entweder kein bzw. wenig Schienenverkehr gegeben war.

Für die Flugplanung wurden folgende Parameter vorgesehen:

- Flugparameter:
 - Inspektion Lärmschutzwand:
 - § Flugsteuerung: Manueller Flug
 - § Abstand: ca. 5m
 - § Überlappung: 55% längs
 - § Fluggeschwindigkeit: 0,7m/s
 - Inspektion Oberleitung:
 - § Flugsteuerung: Manueller Flug
 - § Abstand: ca. 5m
 - § Überlappung: 10% längs
 - § Fluggeschwindigkeit: 1,5m/s
 - Orthofoto Streckenabschnitt:
 - § Flugsteuerung: Wegpunktflug Grid
 - § Flughöhe: 70m

- § Überlappung: 80% / 70%
- § Fluggeschwindigkeit: 4,5m/s

Die Datenerfassung erfolgte am 08.05.2019 mit einer Dauer von rund 8 Stunden bei trockenen und sonnigen Witterungsverhältnissen.

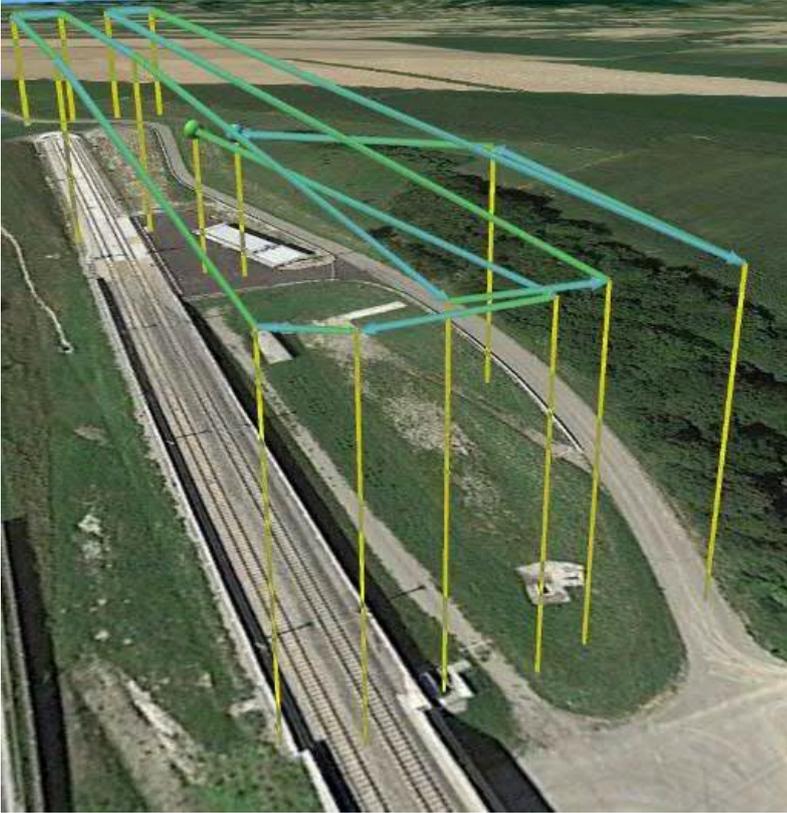


Abbildung 171: Flugplanung Orthofoto GZU St. Pölten

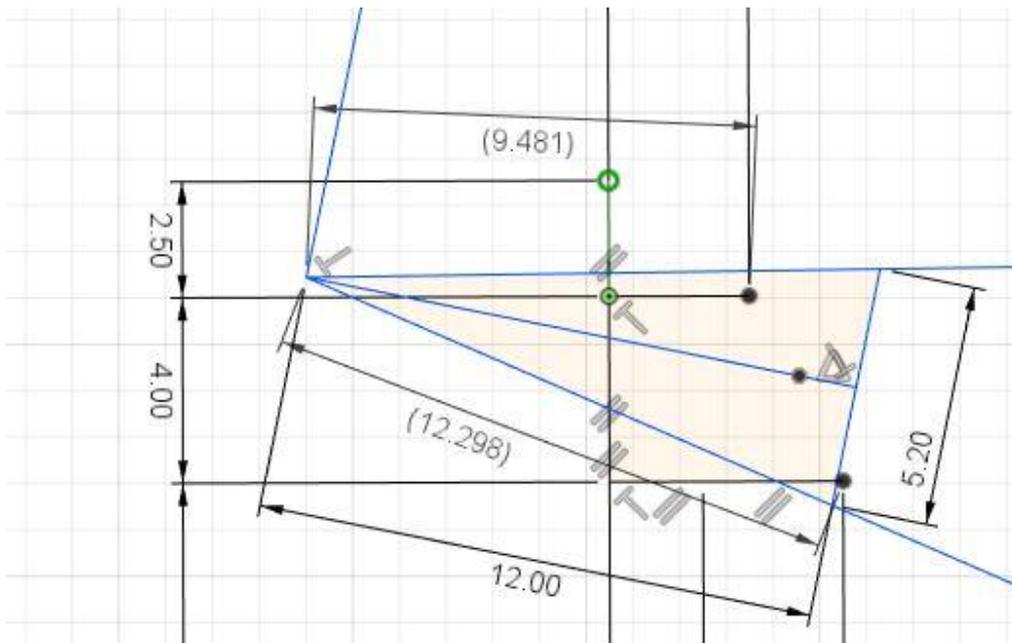


Abbildung 172: Flugplanung Erfassung Oberleitung GZU St. Pölten



Abbildung 173: Impressionen von der Güterzugumfahrung St. Pölten

7.4 Datenauswertung Einsatz

7.4.1 Streckeninspektion Pöchlarn und Rastplatz (ASFINAG)

Wesentliche Voraussetzung für die Digitalisierung der Verkehrsinfrastruktur und der zugehörigen Bauwerke und Anlagen sind regelmäßige Erfassungen als Basis für alle Aufgaben im Lebenszyklus des Betreibers. Weiters sind diese Daten bei entsprechender Aufbereitung wesentlich für Nutzer und Services von Dienstleistern. Wesentliche Aspekte der Streckeninspektion in RISKMON sind vor allem die Sensorauswahl und Durchführung der Streckeninspektion. Weiters die Aufklärung und Freigabe an Strecken der ÖBB und ASFINAG mit Einbindung in die Bestandssysteme sowie GIS samt Einsatzempfehlung. Ausgehend von den Ergebnissen der Workshops wurde ein Streckenabschnitt der A1 – Westautobahn mit dem Rastplatz Onding für die Erfassung ausgewählt (Abbildung 174). Abbildung 175 zeigt den Flugplan für die Erfassung des Rastplatzes zusammen mit Detailausschnitten der 3D – Rekonstruktion (Abbildung 176). In Hinblick auf den Datenschutz ist insbesondere auf eine Unkenntlichmachung von Personen und Kennzeichen zu achten, was sowohl manuell oder automatisiert für Bilder und Videos erfolgen kann. Für die Zustandserfassung z.B. der Fahrbahn ist es dagegen zielführender, aufgenommene Fahrzeuge vor der Rekonstruktion zu maskieren, um Artefakte zu vermeiden.

Eine besondere Herausforderung ist die Rekonstruktion bzw. Zusammensetzung thermografischer Aufnahmen, da die eingesetzten Kameras nur über eine geringe Auflösung verfügen (Abbildung 177). Für die Streckeninspektion insbesondere an befahrenen Autobahnen ist weiters die Wahl des Flugpfades wesentlich, um die Sicherheit des Verkehrs zu gewährleisten und Störungen zu minimieren. In Abstimmung mit der ASFINAG wurde daher ein Flugpfad seitlich parallel zum Streckenverlauf gewählt (Abbildung 178). Die Befliegung mit entsprechender Überlappung der Bilder (Abbildung 179) ermöglicht zwar eine Rekonstruktion der Fahrbahn mit hoher Auflösung (

Abbildung 180, Abbildung 181) führt jedoch naturgemäß zu Lücken in toten Sichtwinkeln in 3D – Modell und Orthofotos (Abbildung 182). Basierend auf den Ergebnissen von RISKMON kann die Streckenerfassung mittels UAS unmittelbar umgesetzt werden. Wesentlich für gute Ergebnisse sind vor allem Ziel, Auswahl geeigneter Sensoren und Flugplanung.



Abbildung 174: S1 Streckeninspektion Pöchlarn – Übersicht Projektgebiet



Abbildung 175: S1 Streckeninspektion Pöchlarn – 3D – Modell und Flugplan Rastplatz



Abbildung 176: S1 Streckeninspektion Pöchlarn – 3D - Modell Rastplatz mit Detailzoom (Mesh)

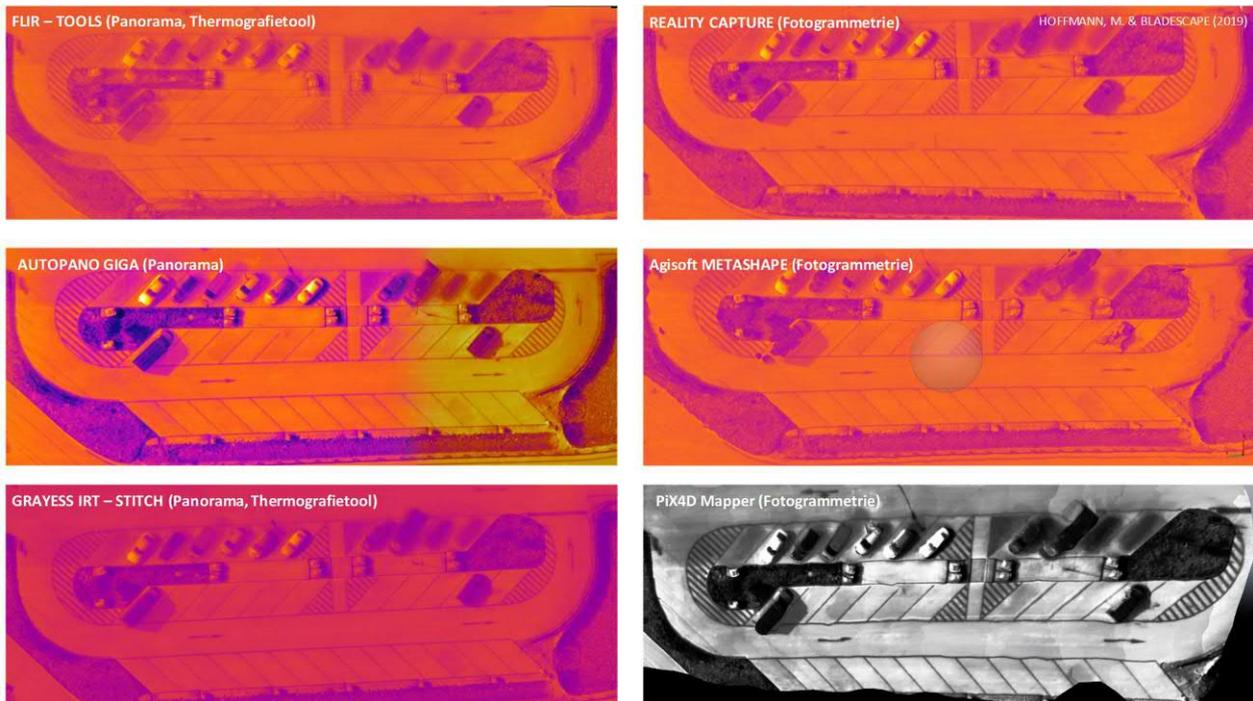


Abbildung 177: S1 Streckeninspektion Pöchlarn - Orthofoto Rastplatz Thermografie (diverse Tools)

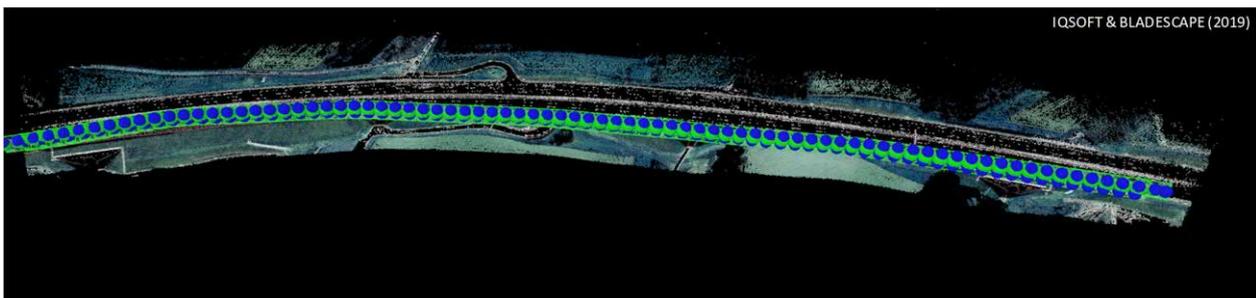


Abbildung 178: S1 Streckeninspektion Pöchlarn - Kamerapfad für die fotogrammetrische Erfassung

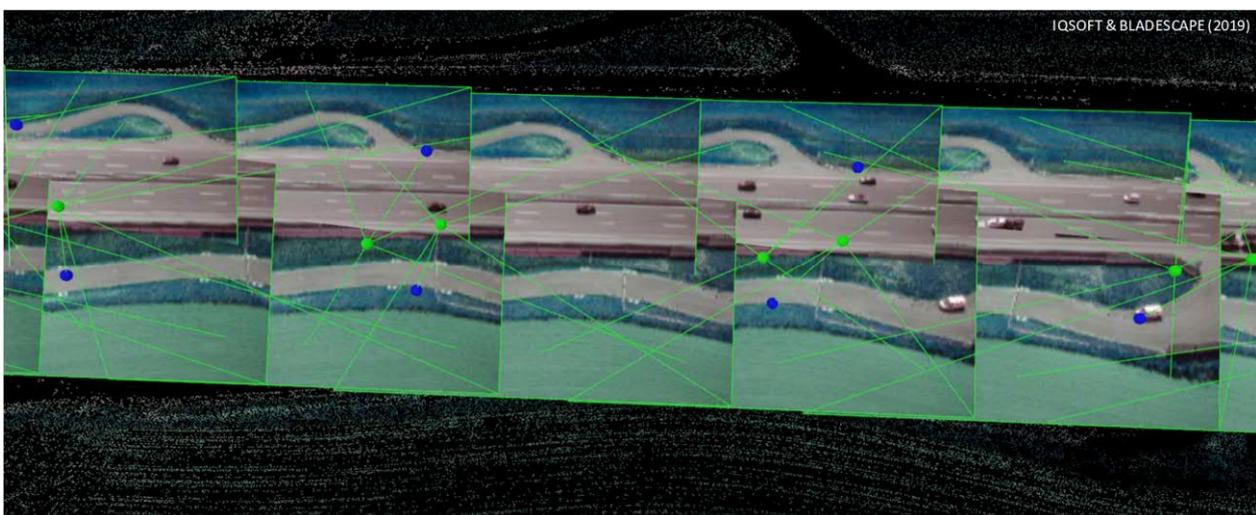


Abbildung 179: S1 Streckeninspektion Pöchlarn – Ausschnitt verortete Aufnahmen mit Überlappung für die fotogrammetrische Rekonstruktion

7.4.2 Streckeninspektion St. Pölten (ÖBB)

In der Streckeninspektion bzw. Erfassung von Bestandsstrecken der ÖBB sind die Sicherheit bzw. Störung des Verkehrs sowie die Anonymisierung der Daten generell ein geringeres Problem. Eine wesentlichere Herausforderung stellt dagegen die Zusammenführung der Daten von unterschiedlichen Quellen und Auflösung dar (Fotogrammetrie, Streckenscan vom Zug, Tunnelscan, stationär terrestrisch, airborne mit UAV).⁵⁴ Neben der Verwendung derselben Koordinatensysteme, Projektion und Format erfordert es entsprechende Algorithmen und Tools für die Verschneidung der Ergebnisse mit einer möglichst geringen Anzahl an Artefakten und Verzerrungen. Eine abschnittsweise Zusammenführung ist mit modernen Tools über Passpunkte und Alignment-Algorithmen relativ einfach semi-automatisiert möglich. Sind durchgehende Aufnahmen (Streckenscan) vorhanden, so kann es sinnvoll sein, die entzerrten bereinigten Ergebnisse als „Leitsystem“ zu definieren, in welche Detailaufnahmen vor Ort einzufügen sind.

In der Auswahl und Einsatzplanung von RISKMON wurde gemeinsam mit den ÖBB der Streckenabschnitt südlich von St. Pölten neben der A1 – Westautobahn ausgewählt (Abbildung 183). Wie Abbildung 184 zeigt, können bereits allein mit fotogrammetrischen Aufnahmen durch UAV hochgenaue Orthofotos und 3D – Modelle rasch und kostengünstig als Basis für vielfältige Anwendungen erstellt werden. Periodische Erfassungen der Strecke mittels Laserscan und Messzug sind eine gute Basis die Digitalisierung, erlauben aber aufgrund des begrenzten Sichtwinkels keine vollständige Erfassung des Streckenbandes (Abbildung 185). Eine Kombination mit entsprechend leistungsfähigen Airborne-Laserscanning kann helfen, bestehende Lücken effizient zu schließen und vollständige Aufnahmen des Streckenbandes zu generieren. Für die Detektion von Schäden an Bauwerken ist dagegen eine entsprechende Auflösung erforderlich, was derzeit nur über Nahscans oder fotogrammetrische Aufnahmen sinnvoll realisierbar ist.

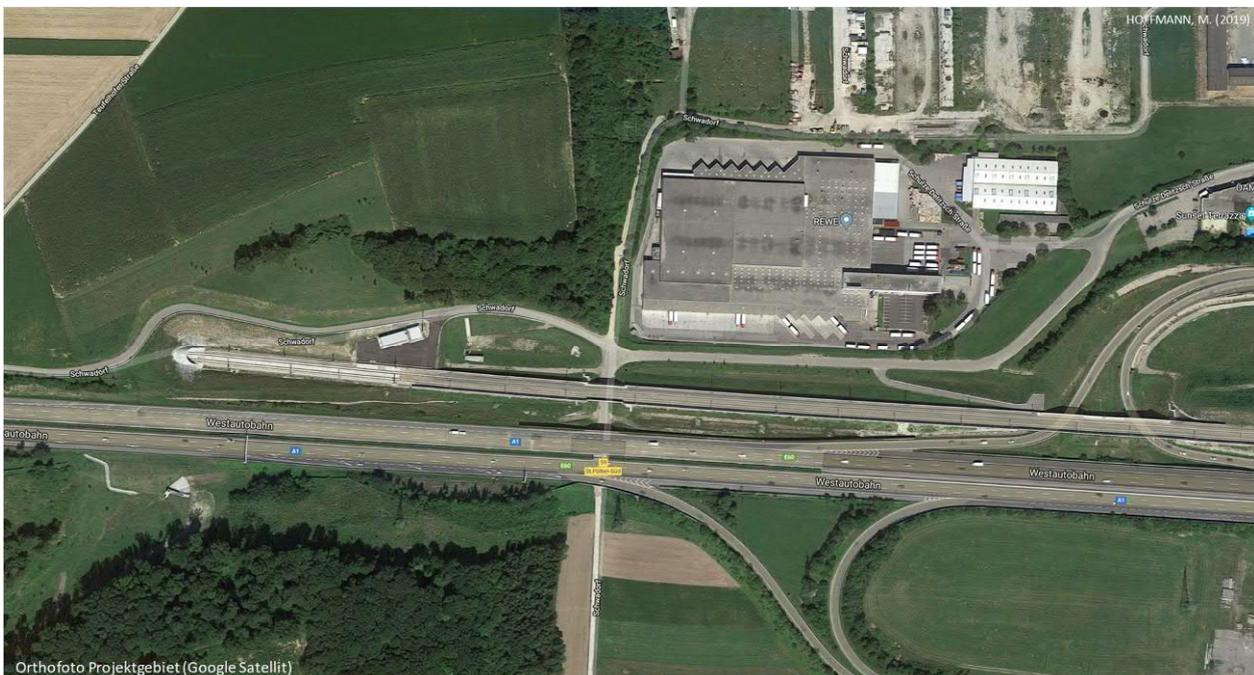


Abbildung 183: S2 Streckeninspektion St. Pölten - Übersicht Projektgebiet

⁵⁴ vgl. Ausschreibungsleitfaden VIF2019 (10/2019) – 2.2.3 Zusammenführung von Laserscandaten verschiedener Quellen

Der überwiegende Anteil der Softwaretools zur Rekonstruktion (Kap. 3.3) unterstützt Punktwolken, jedoch nur ein geringer Anteil bietet eine native Prozessierung mit Bilddaten. Die Kombination beider Quellen erlaubt sowohl eine hochgenaue Rekonstruktion der Geometrie (Laserscan), als auch die Erstellung von 3D – Modellen mit hochauflösender Textur (Bilddaten), was insbesondere in der Digitalisierung und Zustandserfassung von Bauwerken vorteilhaft ist. Aufbauend auf die Erkenntnisse von RISKMON erscheint eine Umsetzung bereits jetzt möglich.



Abbildung 184: S2 Streckeninspektion St. Pölten – Auflösung Google Maps VS Orthofoto RISKMON

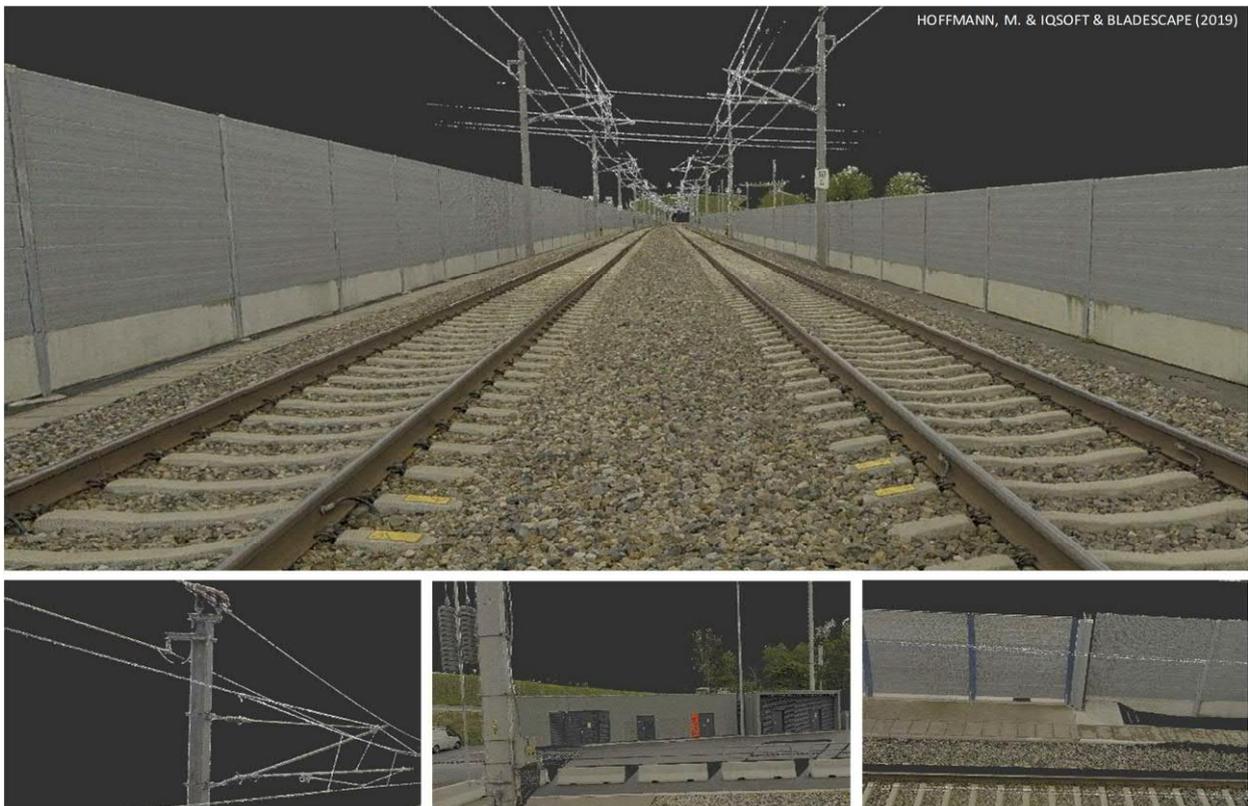


Abbildung 185: S2 Streckeninspektion St. Pölten – Ausschnitte Laserscan

7.5 Vergleich und SWOT-Analyse

Eine systematische Evaluation basiert auf Zielsetzungen, Kriterien und Indikatoren für eine qualitative oder quantitative Analyse. Als Basis für Entscheidungen ist zudem ein Vergleich mit Standards, bereits erzielten Resultaten oder Handlungsalternativen im Verhältnis zu den erforderlichen bzw. eingesetzten Ressourcen erforderlich. Die für RISKMON gewählte SWOT – Analyse dient dazu in den Handlungsfelder Stärken auszubauen, Schwächen zu minimieren, Chancen zu nutzen und mögliche Bedrohungen rechtzeitig zu erkennen. Die SWOT – Analyse zum Einsatz **mobiler Sensorik bei der Zustandserfassung und Streckeninspektion** fasst die Ergebnisse von RISKMON im Vergleich zu den bisherigen Standards und Methoden übersichtlich zusammen (Tabelle 66).

Aus Sicht von RISKMON liegt die größte Stärke in der Streckeninspektion in der schnellen, hochauflösenden Bestands- und Zustandserfassung sowie Änderungsdetektion und Freigabe an Strecken der ÖBB und ASFINAG mit Möglichkeit der Einbindung in BIM und GIS. Im Gegensatz zu Bauwerken sind die Softwaretools, Algorithmen und Werkzeuge für die Erstellung von Punktwolken, texturierten 3D – Modellen und Luftbildern weitgehend vorhanden. Die größte Schwäche liegt in der erforderlichen systematischen Aufbereitung und Datenhaltung mit unterschiedlichen Detailstufen für die Visualisierung und Integration mit Bestandsplänen. Die größte Chance für den Betreiber liegt in der Nutzung aktueller Aufnahmen in der Digitalisierung, für die Entscheidungsfindung sowie Aufrechterhaltung der betrieblichen Verfügbarkeit. Die größten Risiken bestehen im Einsatz schlechter Aufnahmen, unzureichender Tools und für Mapping und Datenhaltung sowie nicht ausreichenden Funktionalitäten für Analyse und Darstellung, wodurch die angestrebte Akzeptanz und der mögliche erreichbare Mehrwert verfehlt werden.

Tabelle 66: SWOT – Analyse Einsatz mobiler Sensorik in der Streckenerfassung

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Hochqualitative Datenerfassung in Abhängigkeit der Gerätewahl und der Flugplanung zu großen Teilen unmittelbar einsetzbar • Erfassungsaufwand mit Sensorwahl und Auflösung der Aufnahmen je nach Anforderung skalierbar • Aktuelle Datengrundlagen für die Erhöhung der Verfügbarkeit und Effizienzsteigerung der Aufgaben • Nachvollziehbare Ergebnisse durch schnelle Aufklärung und quantitative Erfassung möglich • Auswertung und Änderungsdetektion als Grundlage für autonome Aufklärung an der Strecke, Konzeption für die Digitalisierung, Überlagerung Bestandspläne und Änderungsdetektion vorhanden • Konkrete Anwendungsbeispiele mit Formaten und Instrumenten der Datenauswertung erarbeitet • Klar strukturiertes Datenmanagement in Bestandsystemen für rasche Verfügbarkeit gezeigt 	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionen in Software, IT -Systeme und Schulungen bei Betreibern nötig • Fluggenehmigung über/seitlich der Strecke insbesondere für ASFINAG einzuholen • Hohe Anforderungen an Expertise des UAS-Einsatzteam zur Ausschaltung von Zwischenfällen • Integration in GIS mit Bestandsplänen sowie Funktionalität für Straßenbetrieb (z.B. Mähen) erforderlich • Lösung für Aufbereitung und Datenhaltung muss kommuniziert werden, um Akzeptanz zu finden
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Digitalisierung Bestandsstrecken und Anlagen mit aktuellen Bestandsplänen als Entscheidungsbasis • Einsatz Ergebnisse in Planung, Ausbau, Betrieb, Erhaltung sowie für Kunden und Dritte • Wesentliche Grundlage für autonomes Fahren und Service für diesbezügliche Anbieter 	<ul style="list-style-type: none"> • Schlechte Datenqualität durch unzureichende Ausschreibung, Befliegung und Auswertung • Nicht ausreichende Investition in Gewährleistung hoher Qualität, Professionalität und Zuverlässigkeit • Unzureichende Tools für Datenhaltung und Auswertung führt zu geringer Akzeptanz und Mehrwert

7.6 Ergebnisse und Empfehlungen

Das Forschungsprojekt RISKMON von BMVIT, ÖBB, ASFINAG und FFG erforscht die Konzeption, Umsetzung und Integration teilautomatisierter Inspektionen mittels unbemannter Luftfahrzeugsysteme und Sensorik (UAS). Im **Einsatzbereich Zustandserfassung und Streckeninspektion** geht es um die Bestands- und Zustandserfassung sowie Änderungsdetektion und Freigabe an Strecken der ÖBB und ASFINAG mit Einbindung in die Bestandssysteme sowie GIS samt Einsatzempfehlung. Die Zustandserfassung und Digitalisierung der Bestandsstrecken kann mit unterschiedlichen Werkzeugen (UAS, stationär/mobil terrestrisch), Sensoren (Laserscan, Fotogrammetrie, Thermografie, Multispektral etc.) in unterschiedlicher Auflösung erfolgen. Je nach Anwendergruppe (Betreiber, Nutzer, Behörden, Dienstleister) ergeben sich zudem höchst unterschiedliche Anforderungen an Datenqualität, Datenaufbereitung und Bereitstellung. Aufgrund der Breite der möglichen Anforderungen und Anwendungen bauen die Ergebnisse und Empfehlungen vor allem auf die bisherige Anwendung durch den Betreiber sowie die Forschungsergebnisse von RISKMON auf:

- **Strategieentwicklung:** Die Zustandserfassung und Digitalisierung des Streckennetzes erfolgt am besten durch eine Kombination der verfügbaren Werkzeuge in Abstimmung mit den Anforderungen der Anwendergruppen auf Basis eines ganzheitlichen Konzeptes und aufbauend auf schrittweise weiterentwickelter Einsatzerfahrung. Die Einbindung ausgesuchter Akteure aus Wissenschaft und Industrie für die spezifische Weiterentwicklung der Anforderungen sowie des Konzeptes ist zur Vermeidung von Fehlinvestitionen und Insellösungen zu empfehlen.
- **Forschung und Entwicklung:** International ist das Thema der Zustandserfassung und der Digitalisierung von einfachen Anwendungen bis zur virtuellen Strecke aus Sicht von Betreibern, Nutzern und Dritten sehr präsent. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen und deren Gewichtung gibt es jedoch derzeit keine bekannten Standards, sondern eine Vielzahl an Teil- und Insellösungen, weshalb die Suche nach „best practises“ nur begrenzt erfolgreich ist. Sinnvoll ist eine schrittweise Implementierung der neuen Erfassungsform und einer einhergehenden Entwicklung. Wesentliche Bausteine sind empfohlen:
 - Sammeln von Erfassungsdaten und Generieren von Erfahrungen zur weiteren spezifischen Konkretisierung von Bedarf und Möglichkeiten. Wesentlich dabei, die Bündelung der Erfahrungen und somit die wachsende Expertise.
 - Konzeptentwicklung Digitalisierung mit Spezifizierung der Anforderungen nach Anwendergruppen sowie Suche nach geeigneten Industriepartnern und Softwaretools
 - Schrittweise Entwicklung der Tools und Algorithmen für eine effiziente Qualitätssicherung, Verschneidung der Datenquellen und Auswertung gemäß den Anforderungen
 - Schrittweise Schaffung einer Datenbank für die Bereinigung und Sicherung von Rohdaten und Ergebnisdaten sowie deren Analyse und Visualisierung zusammen mit einer Überlagerung mit Zusatzinformationen je nach Anwendungsfeld und Anwendergruppe
- **Schulung und Weiterbildung:** Die effiziente Umsetzung der gezeigten Anforderungen, Daten und entwickelten Anwendungen erfordern die Bewahrung von bestehendem Wissen und darauf aufbauend KnowHow-Entwicklung für die neuen Methoden und Anwendungen als Basis für eine effiziente Umsetzung im Unternehmen mit empfohlener
 - Definition einer zentralen Koordinierungsstelle
 - Definition von Ansprechpartnern, Industriepartner und Auswahl motivierter Mitarbeiter
 - Training der Mitarbeiter der Digitalisierungsgruppe
 - Definition von Schnittstellen und Funktionalitäten für die Anwendung
 - Festlegen Standards und Schulung für Ausschreibung, Vergabe und Leistungsabnahme

- **Praktische Umsetzung:** Das Ziel in der praktischen Umsetzung besteht in der schrittweisen Implementierung der neuen Erfassungsmethoden sowie laufende Entwicklung und Aktualisierung der erforderlichen Funktionen auf Basis eines schrittweise zu erarbeitenden ganzheitlichen Konzeptes samt Bereitstellung der Finanzierung für die
 - Kombination praktischer Anwendungen, deren schrittweise Entwicklung und der stufenweisen Integration
 - Entwicklung und Umsetzung Digitalisierung und virtuelle Strecke
 - Nutzung im Unternehmen sowie außerhalb für die definierten Anwendungsbereiche
- **Kommunikation:** Wesentliche Voraussetzung jeder erfolgreichen Umsetzung sind eine klare Kommunikation der Zielsetzungen sowie der erwarteten Ergebnisse
 - Vorteile und Potenziale der neuen Methoden
 - Digitalisierungsstrategie, Ansprache strategische Partner und erwartete Ergebnisse
 - Umsetzungsplan, Anforderungen und Kommunikationsstrategie intern
 - Kommunikation von Strategien, Etappenzielen und Ergebnissen intern/extern

8 Zustandserfassung Ereignisse

8.1 Konzeption Zustandserfassung

Ausgehend von der Beschreibung der Standards in der Erfassung von Störfällen und außergewöhnlichen Ereignissen sowie den Besprechungen mit den Infrastrukturbetreibern ÖBB und ASFINAG ist eine Zustandserfassung und Intervention mittels mobiler Sensorik zu konzipieren. Konkret besteht die Zielsetzung von RISKMON in der Konzeption und Anwendung der Aufklärung bei Störmeldungen an der Strecke (ÖBB) sowie der Demonstration der Erfassung und Abwehr von Gefahren stationär (ASFINAG) an Anlagen oder Unfallstellen. Dazu sind folgende Aufgaben umzusetzen:

- Abklärung der Einsatzmöglichkeiten von UAV in der Streckenaufklärung und Gefahrenabwehr von ÖBB und ASFINAG
- Konzeption und Test schnelle Streckenaufklärung bei Zutritt unbefugter mittels UAV (z.B. Thermografie, Kamera)
- Schnelle Aufklärung bei Störmeldungen an Anlagen (z.B. Steinschlag, Setzungen)
- Analyse im Einsatz zur Aufklärung andere Störungen (z.B. Simulation Kupferdiebstahl)
- Möglicher Einsatz in der Erfassung von Unfällen oder Ereignissen
- Machbarkeit und Möglichkeiten der Gefahrenabwehr / Jammen / Identifikation bei Zutritt Unbefugter (stationär)

UAV können sowohl in der Aufklärung an der Strecke bei Ereignissen sowie der Erfassung, Identifikation und Abwehr Unbefugter eingesetzt werden. Bei einem Testeinsatz auf der Strecke nach einer Zutrittsmeldung werden der grundsätzliche Einsatz der UAV sowie die Effizienz in Hinblick auf Aufklärung und Streckenfreigabe geprüft. Alternativ kann im Akutfall einer Störmeldung (z.B. Murenabgang) eine schnelle Aufklärung und Beurteilung im unwegsamen Gelände erfolgen. Für den stationären Einsatz kann eine Unfallsituation ganzheitlich erfasst und für die spätere Auswertung z.B. durch Sachverständige fotogrammetrisch bzw. für den 3D – Viewer aufbereitet werden. Die Detektion, Identifikation und Abwehr Unbefugter anhand neuer Technologien kann beispielhaft in einer Teststellung oder anhand eines Technologievergleiches demonstriert werden. Der potenzielle Nutzen liegt in der schnellen Erfassung und Aufklärung bei Störmeldungen (Streckenfreigabe) sowie der Demonstration der Gefahrenabwehr bzw. Identifikation / Jammen z.B. bei Eindringen Unbefugter.

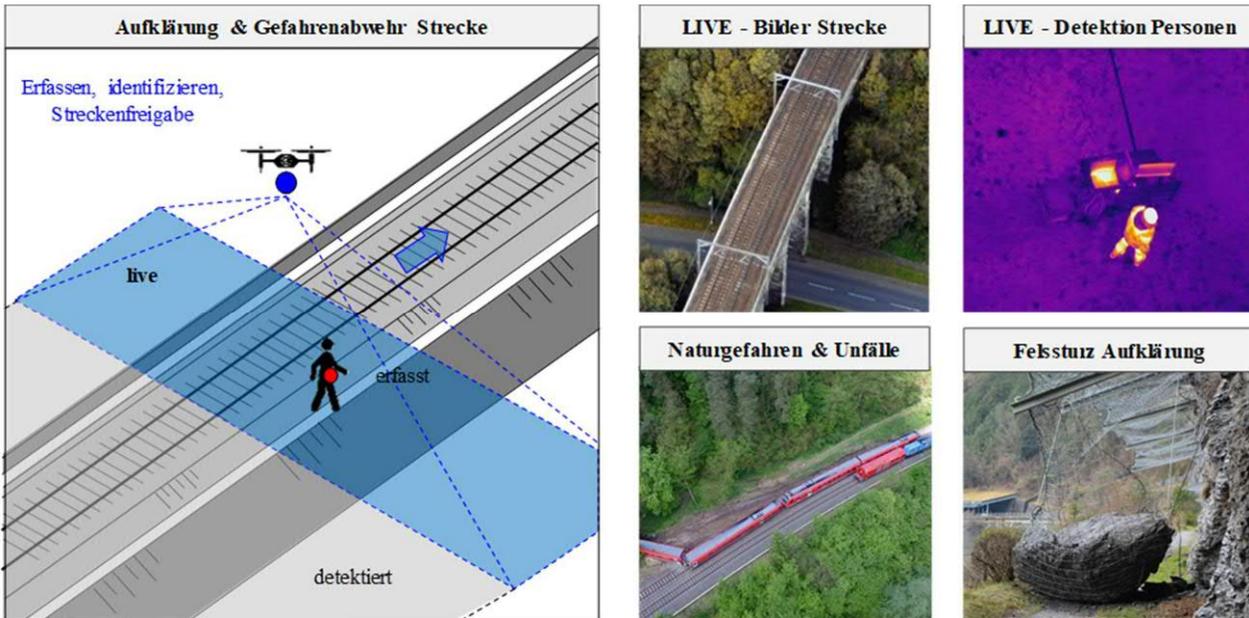


Abbildung 186: Konzeption der Aufklärung und Gefahrenabwehr auf der Strecke mit Einsatz bei Störmeldungen, und Vergleich des Aufklärungsaufwandes mit Einsatzteam für die SWOT - Analyse

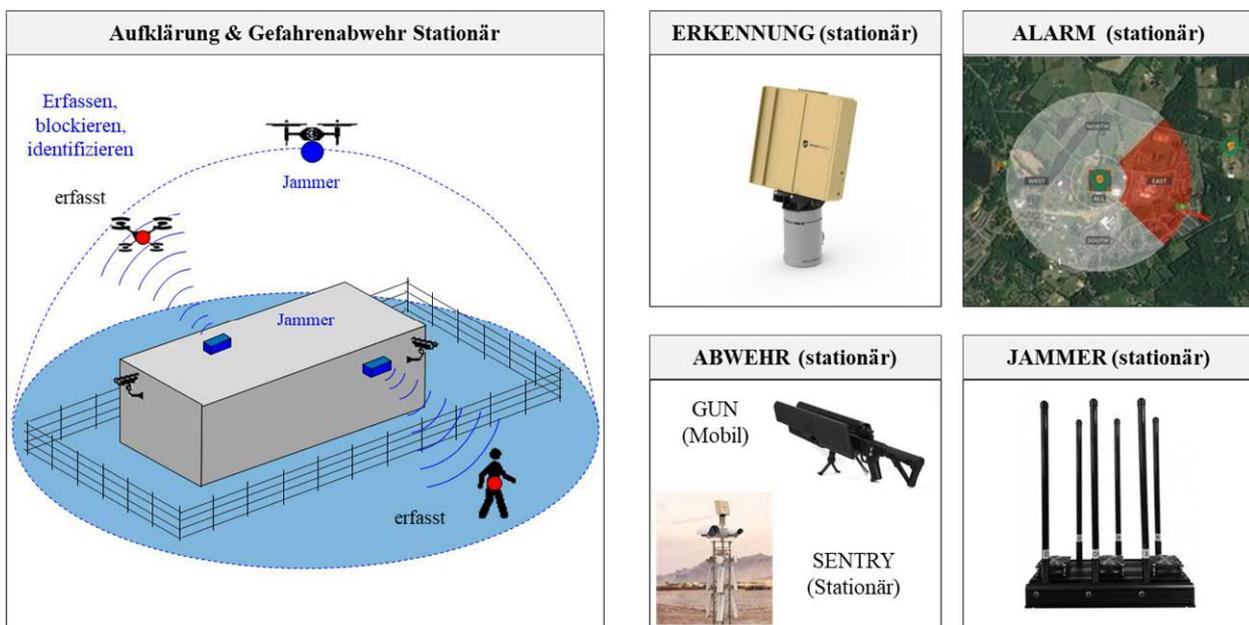


Abbildung 187: Konzeption der Aufklärung und Gefahrenabwehr bei stationärem Einsatz mit Erkennung, Alarmierung, UAVUAV-abwehr (aktiv/passiv) und Aufklärung

8.2 Auswahl Einsatzgebiet/Fälle

8.2.1 Brainstorming-Workshops

Durch 2 Termine wurde das Potenzial in unterschiedlichen Bereichen von der Hilfsstellung bei Unfällen oder außergewöhnlichen Ereignissen bis zur Abwehr von ungewollten unbemannten Luftfahrzeugen in Bereichen von Gebäuden oder Grundstücken der AG beurteilt.

Tabelle 67: Terminübersicht im Teilbereich Außergewöhnliche Ereignisse

Datum	Ziel des Termins
28.11.2017	Projekt Kick-off Meeting
24.5.2018	Konkretisierung möglicher Anwendungen

Die innerhalb der Workshops definierten Ansprechpartner sind in Tabelle 68 aufgelistet. Aufgabe der Ansprechpartner ist es, als Kommunikationsschnittstelle zwischen den internen Stellen der AG und dem Projektteam zu fungieren und die erste Ansprechstelle für fachliche Fragen zu bilden.

Tabelle 68: Ansprechpartner im Teilbereich Außergewöhnliche Ereignisse

Kategorie	ASFINAG	ÖBB
Außergewöhnliche Ereignisse im Gleisbereich	-	Jürgen Sommer, Robert Straubinger
Außergewöhnliche Ereignisse im Autobahnumfeld	Christoph Wrusz	-

Nachfolgend eine Zusammenstellung aller Ideen und Anregungen, die im Rahmen der Workshops angesprochen wurden.

Unfälle, Großschadenereignisse,

- bessere Übersicht über den gesamten Einsatz- bzw. Schadensbereich ohne das sich dabei Einsatzkräfte selbst in Gefahr bringen müssen, speziell bei besonderen Gefährdungslagen (schwer zugängliche Bereiche, Hochwasser, Lawinengefahr, Feuer usw.)
- Drohnen werden nicht müde und können auch bei schlechter Sicht (Nacht, Nebel, Verrauchung usw.) hilfreiche Bilder liefern (z.B. Wärmebildkamera).
- Drohnen können Bilder (Videos) aus Bereichen bzw. Perspektiven liefern die im Normalfall für Menschen nicht oder nur sehr schwierig zugänglich, bzw. nur unter großer Gefahr möglich wären.
- umfangreichere und /oder bessere Lageeinschätzung
- als Unterstützung für den Einsatzleiter (Vorort und NOKO) bzw. die Einsatzleitung und alle beteiligten Blaulicht- bzw. Hilfsorganisationen.
- Reduktion der Gefährdungen für Einsatzkräfte

Großveranstaltungen

- Bessere Übersicht über größere Bereiche, zur einfacheren Überwachung bzw. frühzeitigen Erkennung von Besucherströmen und zur Überwachung möglicher Gefährdungsbereiche (z.B. Gleisüberschreitungen)
- Umfangreichere und /oder bessere Lageeinschätzung Unterstützung der Einsatzleitung
- Effiziente Einsatzsteuerung der Sicherheitskräfte Vorort Reduktion der Gefährdungen für Einsatzkräfte

Personalunterstützende Einsätze

- Überwachung/Bestreifung größerer und/oder schwer zugängiger Anlagen, Objekte und Bereich (z.B. Abstellanlagen, Lagerstätten)
- umfangreichere und /oder bessere Lageeinschätzung
- ressourcenschonende (Personal), zeitlich effiziente Überwachung möglichst großer Einsatzbereiche.
- Reduktion der Gefährdungen für Einsatzkräfte.

Spezifische außergewöhnliche Ereignisse im Autobahnumfeld:

- Kontrolle nicht videoüberwachter Bereiche entlang der Autobahn
- Drohne darf nicht zur Ablenkung der Fahrer werden
- Im Krisenfall trifft die Exekutive alle Entscheidungen und ist auch für die Dokumentation verantwortlich
- Häufigste Ereignisse: Pannen, Stau, Auslösen der Höhenkontrolle, Geisterfahrer und Sonstiges

Spezifische außergewöhnliche Ereignisse im Gleisbereich:

- Auffinden von Schlafplätzen und Menschenansammlungen am ÖBB Gelände
- Auffinden von Kupferdiebstählen
- UAV-Abwehr ist interessant, war allerdings noch nie notwendig

8.2.2 Expertenbefragung

Nach Absprache mit den Fachexperten der AG und dem Steuerungsteam wurden die, im Angebot beschriebenen Teststellungen, für eine Umsetzung angedacht. In nächsten Schritten werden diese mit den Experten der AG angepasst. Eine aktuelle Auflistung der Teststellungen wurde im Rahmen einer Expertenbefragung zusammengefasst.

Tabelle 69: Ausschnitt aus Expertenbefragung im Teilbereich Außergewöhnliche Ereignisse

Beschreibung der Anwendung	Machbarkeit	Standardanwendung	RZF Durchführung	Person auf Strecke	Detektion und Abwehr UAV	Einsatzunterstützung bzw. Krisenmanagement
Eingereicht von				TEAM RISKMON	TEAM RISKMON	TEAM RISKMON
Firma						
Typ				Detektion	Detektion und Abwehr	
Wertung						
Einsatzunterstützung im Krisenfall	ja	ja				ja
Unterstützung bei der Beurteilung ob Unfallstelle gefahrenlos, Hilfskräfte Zugang gewährt werden kann, oder noch Risiko besteht (bspw. bei Murenabgang)	ja	nein				ja
Erfassung und Dokumentation von Unfällen	ja	ja				ja
Entscheidungsunterstützung in nicht videoüberwachten Bereichen	ja	nein				
Überprüfen von Umfahrungen	ja	ja				
Abwehr ungebeter UAV (von bspw. Schaulustigen oder Journalisten) im Krisenfall bzw. bei Großereignissen	ja	nein			ja	
Auffinden von Kupferdiebstählen	ja	nein				
Kontrolle von Störungen im Gleisbereich	ja	ja				ja
Auffinden von Objekten/Personen im Betriebsbereich	ja	nein		ja		

8.2.3 Ergebnis und Beschluss

Im Rahmen des Steuerungsteammeetings am 6.6.2018 wurden die angebotenen Teststellungen beschlossen. In folgender Tabelle können die festgelegten Teststellungen überblickt werden.

Tabelle 70: Beschlossene Teststellungen im Teilbereich Außergewöhnliche Ereignisse

Kat.	Angebot	Teilbereich	Vorschlag	Objekttyp	Unternehmen
D	1. Aufklärung	Außergewöhnliche Ereignisse	Streckenabschnitt, Detektion Person	Personendetektion	ÖBB
D	1. Detektion/Abwehr Unbefugter - Strecke	Außergewöhnliche Ereignisse	Unterstützung Krisenmanagement	Einsatzunterstützung bzw. KriMa	ÖBB/ASFINAG
D	2. Detektion/Abwehr Unbefugter Stationär	Außergewöhnliche Ereignisse	Detektion und Abwehr UAV	UAV-Abwehr	ÖBB/ASFINAG

8.2.4 Änderungen und Terminvorschau

Im Rahmen des Steuerungsteam-Meetings am 17.01.2019, sowie der telefonischen Abstimmung in KW 15, wurde auf Basis der Vorschläge aus der Projektarbeitsgruppe folgende Vorgehensweise beschlossen:

Kat.	Angebot	Teilbereich	Vorschlag	Objektyp	Unternehmen
	1. Aufklärung	Außergewöhnliche Ereignisse	Krisenübung: Unterstützung der Einsatzkräfte im Rahmen einer angelegten Tunnelübung	Erfassung, Vermessung, Personensuche, Livedatenübertragung	ASFINAG
D	1. Detektion/Abwehr Unbefugter - Strecke	Außergewöhnliche Ereignisse	Konzeptiv: Unterstützung Krisenmanagement	Einsatzunterstützung bzw. KriMa	ÖBB
D	2. Detektion/Abwehr Unbefugter Stationär	Außergewöhnliche Ereignisse	Konzeptiv: Detektion und Abwehr UAV	UAV-Abwehr	ÖBB/ASFINAG

8.3 Einsatzplanung

8.3.1 Einsatzübung Tunnel A9 (ASFINAG)

Im Rahmen einer groß angelegten Krisenübung für örtliche Einsatzkräfte von Polizei, Feuerwehr und Rettung in der Steiermark, im Scharnerkogel-Tunnel, am 07.05.2019 wurden insgesamt sechs Aufgabenfelder getestet. Der Tunnel und die Zu- und Abfahrt waren für diesen Einsatz gesperrt und mit den

RISKMON Testanwendung: Einsatzübung Tunnel

Bei Einrichtung Sperre / Umleitung:

1. Verkehrslagebeobachtung 18.55-19.10h

Vor Einsatzübung:

2. Anflugzeit 19.15-19.22h
3. Tunnelkontrolle (Situations- erfassung Unfallfahrzeuge) 19.35-19.50h

Während Einsatzübung:

4. Lagebilderfassung Unfallfahrzeug Tunnelportal 19.55-20.10h
 - Überblick
 - Gefahrgutkennzeichnung
 - Auslaufende Flüssigkeit
5. Vermessung Unfallstelle 20.10-20.20h
6. Suche nach vermisster Person 20.20-20.35h

Übersicht: Wruß/ASFINAG, Dolleschal/BLADESCAPE
Forschungsprojekt RISKMON – ARGE BLADESCAPE, IQSOFT, BOKU-IKI (2017-2019)

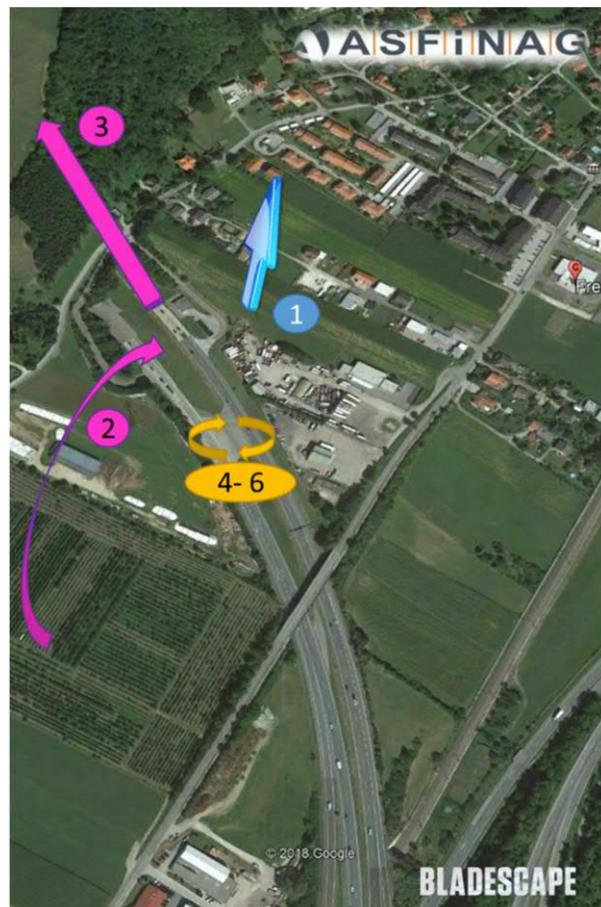


Abbildung 188: Übersicht Testanwendungen Einsatzübung Tunnel

Der Flug zur Verkehrslagebeobachtung, der Flug durch den Tunnel zur Tunnelkontrolle und der Einsatz einer Wärmebildkamera zur Detektion von ausgelaufenem, flüssigem Gefahrgut (im Testfall nur Wasser) und zum Auffinden einer vermissten Person sind nur ein kleiner Auszug der durchgeführten Aufgaben. Die Möglichkeit, die vom UAV erfassten Livedaten den Einsatzkräften zur Verfügung stellen bzw. in eine Einsatzzentrale weiterleiten zu können, hat für die Einsatzbeurteilung, das Treffen von Entscheidungen sowie die Priorisierung der Maßnahmen einen großen Mehrwert.

Aufgrund IT-spezifischer Sicherheitsüberlegungen seitens Auftraggeber konnte zur Übertragung der Livebilder in die Einsatzzentrale nach Bruck ad Mur, die LWL-Anbindung nicht genutzt werden und musste auf eine Übertragung über das Mobilfunknetz ausgewichen werden. Dieses konnte jedoch während der Übung aufgrund von Überlastung und der geografischen Rahmenbedingungen (Hügelland) nicht die ausreichende Qualität liefern.

Die Livedatenübertragung vor Ort sowie die Übungsannahmen konnten entsprechend abgewickelt werden. Die Einsätze wurden vorwiegend manuell geflogen.



Abbildung 189: Live-Bild für die Beobachtung der Verkehrsverlagerung, Tunnelübung



Abbildung 190: Teststellung zur Erfassung des Unfallgeschehens im Tunnel (Ausfall der Überwachungskameras symbolisiert)

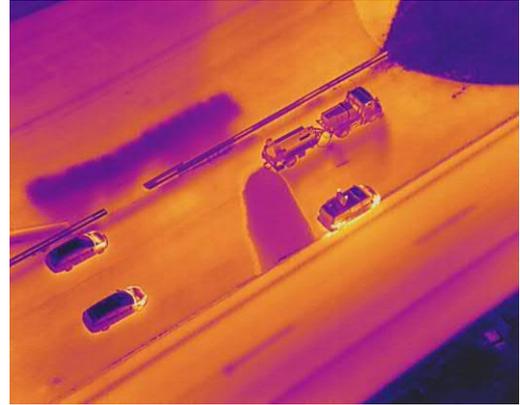
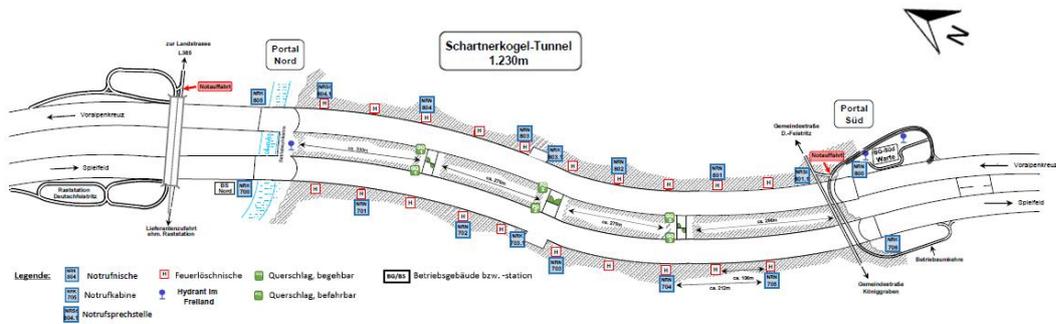


Abbildung 191: Erfassung und Nachverfolgung eines auslaufenden Gefahrenstoffes (symbolisiert mittels Wasser) mittels RGB und Wärmebild



Abbildung 192: Erfassen und aufspüren vermisster Personen mittels Wärmebildkamera



- Legende:**
- Notrufnische
 - Feuerlöschnische
 - Querschlag, begehbar
 - Betriebsgebäude bzw. -station
 - Notrufrkabine
 - Hydrant im Freiland
 - Querschlag, befahrbar
 - Notrufspruchstelle

- Checkliste:**
- > Objektpläne
 - > Funkorganisation
 - > Wärmebildkamera! SKG + LPA
 - > Einweisung nachrückender Kräfte
 - > Bereitstellungsraum
 - > Wasserversorgung (Einspeisung)
 - > Alternative Zugänge (gesunde Röhre)
 - > Personen gefährdet?
 - > Standort von Fahrzeugen im Tunnel (Info Erkundungstrupp)
 - > ATZ-Reserve vorhanden – eventuell Nachalarmierung z.B. BF-Graz, WAB
 - > Atemluftfahrzeug
 - > Beleuchtung
 - > Angriff von 2 Seiten
 - > Belüftung – Strömungsrichtung beachten
 - > Zu- Abfahrt freihalten
 - > Einbindung Rettung, Polizei, Asfinag
 - > Presse

Basisdaten Nord						Basisdaten Süd					
Art	Einheit	Stk	ATZ-Reserve	ATZ-Reserve	Störung	Art	Einheit	Stk	ATZ-Reserve	ATZ-Reserve	Störung
SPRINT			Stk	Stk		SPRINT			Stk	Stk	
WFF (Schichtdienst) 24h/24h		22				WFF (Schichtdienst) 24h/24h		22			
WFF (Lernend) 24h/24h		24				WFF (Lernend) 24h/24h		24			
RLF T-Überbach/Markt		15				RLF T-Überbach/Markt		15			
RLF Peggau		14				RLF Peggau		14			

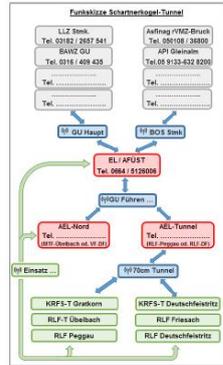


Abbildung 193: Übersichtsplan Schartnerkogel-Tunnel



Abbildung 194: Impressionen der Einsatzübung Tunnel A9

8.4 Vergleich und SWOT-Analyse

Eine systematische Evaluation basiert auf Zielsetzungen, Kriterien und Indikatoren für eine qualitative oder quantitative Analyse. Als Basis für Entscheidungen ist zudem ein Vergleich mit Standards, bereits erzielten Resultaten oder Handlungsalternativen im Verhältnis zu den erforderlichen bzw. eingesetzten Ressourcen erforderlich. Die für RISKMON gewählte SWOT – Analyse dient dazu in den Handlungsfelder Stärken auszubauen, Schwächen zu minimieren, Chancen zu nutzen und mögliche Bedrohungen rechtzeitig zu erkennen. Die SWOT – Analyse zum Einsatz **mobiler Sensorik bei außergewöhnlichen Ereignissen** fasst die Ergebnisse von RISKMON im Vergleich zu den bisherigen Standards und Methoden übersichtlich zusammen (Tabelle 71).

Aus Sicht von RISKMON liegt der besondere Vorteil im Einsatz mobiler Sensorik in der schnellen, gefahrlosen Aufklärung, der vielfältigen Unterstützung für die Einsatzkräfte und die Krisenstäbe, sowie der Beweissicherung bei außergewöhnlichen Ereignissen mittels unbemannter Luftfahrzeugsysteme. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist die derzeit (noch) geringe Gefahrenlage im Vergleich z.B. zu Naturgefahren oder ungeplanten Ausfällen. Die größte Schwäche liegt in der derzeitigen Unterschätzung der zunehmenden Nutzung von UAV sowie einer sich dadurch verändernden Gefahrenlage und die derzeitige passive Herangehensweise. Die größte Chance für den Betreiber liegt in einer schrittweisen Implementierung und Entwicklung um sich in weiterer Folge auf Basis einer Risikoevaluierung entsprechend vorzubereiten. Die größten Risiken bestehen in einem anhaltend geringen Willen zu entsprechenden Vorbereitungen ohne konkreten Anlassfall sowie der Entwicklung einer geeigneten Logistik für die schnelle Anwendung auf Netzebene bzw. den punktuellen Anlassfall, der nur begrenzt zeitlich/örtlich vorhersehbar ist.

Tabelle 71: SWOT – Analyse Einsatz mobiler Sensorik bei außergewöhnlichen Ereignissen

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Nachvollziehbare Ergebnisse durch schnelle Aufklärung und quantitative Erfassung bzw. Beweissicherung mit mobiler Sensorik möglich • Konkrete Anwendungsbeispiele am Beispiel Einsatzübung und Übersicht Abwehrmaßnahmen gezeigt • Unterstützung durch Einsatz von UAS-Lösungen zu großen Teilen bereits einsetzbar • Mit Spezialnutzlasten (z.B. Lautsprecher, Flugzettelbox) bestückte UAS steigern die Effizienz der Einsätze • Generelle Gefahrenlage zur UAV-Abwehr für Verkehrsinfrastruktur aufgrund Lagebeurteilung Experten derzeit gering • Ansätze für Gefahrendetektion, Aufklärung und präventive Intervention aufgezeigt • Hohe Sicherheit und Verfügbarkeit der Infrastruktureinrichtungen derzeit (noch) gegeben • 	<ul style="list-style-type: none"> • Bisherige Sicherheitskonzepte berücksichtigen Einsatz mobiler Sensorik und UAS nicht • Investitionen in Software, IT -Systeme und Abwehrmaßnahmen nötig • Zusätzliche Behördenwege für die Genehmigungen • Wissen und Ausbildung mit Gefahrenerkennung und Abwehr von UAV in den Unternehmen nur rudimentär vorhanden • Schrittweise Entwicklung und Anpassung von Unternehmensprozessen für das Nutzen der Vorteile und des nachhaltigen Mehrwertes, wesentliches Gefahrenpotenzial durch verstärkte Nutzung bzw. durch Unbefugte wird derzeit unterschätzt • Kaum Daten und Untersuchungen zu Auswahl und Anwendung von effizienten Abwehrmaßnahmen • Schrittweise Expertenausbildung intern für die Umsetzung der Prozessschritte zu empfehlen
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung Ansätze in Aufklärung, Detektion, Gefahrenabwehr und Schulung • Moderne Gefahrenerkennung und Abwehr als Basis für Resilienz und Sicherheit • Sicherheitsgefühl Kunden, Gefahrenabwehr mit Kommunikation intern/extern als Vorteil 	<ul style="list-style-type: none"> • Passive Haltung Anwender vor Eintritt unterschätzter Gefahren führt zu unzureichender Vorbereitung • Investition in Ausrüstung und Bereitschaft ohne Anlassfall unter Umständen nicht einfach zu argumentieren • Logistik für schnelle Bereitschaft im Anlassfall am Netz ohne geeignetes Sicherheitskonzept schwierig

8.5 Ergebnisse und Empfehlungen

Das Forschungsprojekt RISKMON von BMVIT, ÖBB, ASFINAG und FFG erforscht die Konzeption, Umsetzung und Integration teilautomatisierter Inspektionen mittels unbemannter Luftfahrzeugsysteme und Sensorik (UAS). Im **Einsatzbereich außergewöhnliche Ereignisse** geht es um die Aufklärung und Gefahrenabwehr im Anlassfall auf Bestandsstrecken, Standorten, Unfallbereichen mit Identifikation und Integration Gefahrenpläne von ÖBB und ASFINAG. Die Digitalisierung der Bestandsstrecken sowie die Ausarbeitung entsprechender Einsatzpläne für kritische Anlagen unter Einsatz von UAS sowie zur Abwehr und Identifikation Unbefugter ist ein wesentlicher Baustein der Entwicklung, welche schrittweise aufbauend auf Erfahrung aus einzelnen Anwendungen wachsen sollte. Je nach Anwendergruppe (Betrieb, Einsatzteam, Sicherheitsdienst) ergeben sich große Unterschiede an die Anforderungen der eingesetzten Ausrüstung und Software. Aufgrund der Breite der möglichen Gefahrenquellen, Ereignisse und Strategien bauen die Ergebnisse und Empfehlungen vor allem auf die bisherige Anwendung durch den Betreiber sowie die Recherche der Möglichkeiten im Rahmen des Forschungsprojektes RISKMON auf:

- **Strategieentwicklung:** Der Einsatz von UAS in proaktiver Aufklärung und Gefahrenabwehr bei außergewöhnlichen Ereignissen erfordert eine schrittweise Integration in die Gefahrenpläne mit entsprechender Ausstattung sowie Training des Einsatzpersonals. Die Erstellung und Umsetzung eines entsprechenden Konzeptes für die Umsetzung ist zentrale Voraussetzung für eine schnelle, effiziente Anwendung im begrenzt vorhersehbaren Anlassfall.
- **Forschung und Entwicklung:** Aufbauend auf Einsatzerfahrungen schrittweise Entwicklung und Konkretisierung der Einsatzunterstützung. International ist das Thema der autonomen Überwachung und Ausrüstung für die Gefahrenabwehr für die Verkehrsinfrastruktur zunehmend ein Thema. Aufgrund der derzeit (noch) geringen Gefahrenlage im Vergleich z.B. zu Naturgefahren ist kaum Budget für Forschung und Entwicklung in diesem Feld in Österreich vorhanden. Wesentliche Bausteine für Forschung und Entwicklung sind daher:
 - Generieren von Erfahrungen zur weiteren spezifischen Konkretisierung von Bedarf und Möglichkeiten bei der Einsatzunterstützung. Wesentlich dabei, die Bündelung der Erfahrungen und somit die wachsende Expertise.
 - Konzept mit quantitativer Erfassung kritischer Anlagen, von Gefahrenquellen und Sicherheitsdefiziten sowie Ausarbeitung effizienter Maßnahmen zur Gefahrenminimierung
 - Recherche der verfügbaren Ausrüstung und Software sowie deren konkretem Einsatz in jedem relevanten Gefahrenbereich mit Wirtschaftlichkeitsvergleich vor jeder Beschaffung
 - Auswertung der Ereignisdatenbank der Betreiber mit Recherche und Prognose künftiger Gefahrenquellen als Basis für die Weiterentwicklung bestehender Sicherheitskonzepte
- **Schulung und Weiterbildung:** Die effiziente Umsetzung eines schrittweise zu entwickelnden Sicherheitskonzeptes unter Einsatz von UAS erfordert eine KnowHow-Entwicklung für die neue Methoden und Anwendungen als Basis für eine effiziente Umsetzung im Unternehmen mit empfehlener
 - Definition einer zentralen Koordinierungsstelle
 - Definition von Ansprechpartner, Sicherheitspartner und Auswahl motivierter Mitarbeiter
 - Training der Mitarbeiter zum Einsatz der neuen Methoden
 - Definition von Schnittstellen und Funktionalitäten für die Anwendung
 - Festlegen von Standards für Ausschreibung, Vergabe und Abnahme für die Ausrüstung
- **Praktische Umsetzung:** Das Ziel in der praktischen Umsetzung besteht in der schrittweisen Implementierung der neuen Unterstützungsmethode und in der raschen Aufklärung bei Störungen und außergewöhnlichen Ereignissen sowie der Gefahrenabwehr zur Minimierung von Risiken und Erhöhung der Sicherheit und Verfügbarkeit für Betreiber und Nutzer

- Quantitatives Gefahrenmanagement auf Basis eines schrittweise zu erarbeitenden und ganzheitlichen Sicherheitskonzeptes
- Proaktive Vorbereitung und Investition für den schnellen Einsatz im Anlassfall
- Nutzung von UAS sowie der sonstigen Ausrüstung in Aufklärung und Gefahrenabwehr
- **Kommunikation:** Wesentliche Voraussetzung jeder erfolgreichen Umsetzung sind eine klare Kommunikation der Zielsetzungen sowie der erwarteten Ergebnisse
 - Vorteile und Potenziale der neuen Methoden
 - Sicherheitsstrategie und Konzept in Abstimmung mit strategischen Partnern
 - Umsetzungsplan, Anforderungen und Kommunikationsstrategie intern
 - Kommunikation von Strategien, Etappenzielen und Ergebnissen intern/extern

9 Zusammenfassung und Ausblick

Leitungs- bzw. Verkehrsinfrastruktur ermöglicht wirtschaftliche Beziehungen zwischen Standorten und erlaubt die Teilhabe an Ressourcen, Produkten und Nutzungen in einem gemeinsamen Markt. Die effiziente Bereitstellung von hochrangiger Verkehrsinfrastruktur mit hoher Sicherheit und Verfügbarkeit sowie die Herausforderung der Digitalisierung erfordern den Einsatz moderner Technologien in der Datenerfassung, Analyse und Auswertung. Dementsprechend werden die bestehenden Strategien, Entscheidungsinstrumente, Unternehmensprozesse und verwendete Ausrüstung laufend angepasst und weiterentwickelt. Im Forschungsprojekt RISKMON von ÖBB, ASFINAG, FFG und BMVIT geht es konkret um die hochgenaue Erfassung und Inspektion von Bauwerken, Naturgefahren, Bestandsstrecken sowie Aufklärung und Gefahrenabwehr bei außergewöhnlichen Ereignissen unter Einsatz von Hochleistungsdrohnen und Sensorik. Neben der Potenzialanalyse war die Datenherstellung mittels unbemannter Luftfahrzeugsysteme, teilautomatisierte Auswertung und Integration in die Prozesse bzw. die IT-Struktur und das Asset Management anhand konkreter Anwendungsfälle durch die Projektpartner BLADESCAPE, IQSOFT und BOKU – IKI nachzuweisen. Aufbauend auf die Potenzialanalyse waren weiters konkrete Empfehlungen für die Anwendungen und die mögliche Weiterentwicklung der Erfassungsprozesse für ÖBB und ASFINAG auszuarbeiten.

Erwartete Vorteile eines künftigen Einsatzes unbemannter Luftfahrzeuge in Abhängigkeit der jeweiligen Anwendung und des jeweiligen Erfassungsobjektes im Überblick:

- Ü Verbesserte Zustandserfassung und -dokumentation ® Predictive Maintenance
- Ü Maximierung der Sicherheit und Verfügbarkeit der Infrastruktureinrichtungen
- Ü Effizienzsteigerung durch vereinfachte Prüfabläufe, Optimierung des Mitteleinsatzes und der Lebensdauer
- Ü Reduktion der Personengefährdung bei Erfassung in schwer zugänglichen Bereichen
- Ü Durch exakte Wiederholbarkeit ® Kenntnis Zustandsveränderungen im zeitlichen Kontext
- Ü Klar strukturiertes Datenmanagement in den Bestandssystemen ® rasche Verfügbarkeit

Die Abbildung 195 bis Abbildung 198 zeigen eine Übersicht der in den jeweiligen Kapiteln behandelten Anwendungen mit einer Bewertung, welche Prozessschritte in Abhängigkeit der Anforderungen und des jeweiligen Erfassungsobjektes unmittelbar anwendbar sind bzw. bei welchen noch schrittweiser Entwicklungs- oder Forschungsbedarf bestehen. Infolge der jeweils spezifischen Rahmenbedingungen und Zielsetzungen sind in den einzelnen Kategorien daher auch Anwendungen unmittelbar umsetzbar bzw. besteht zusätzlicher Entwicklungs- oder Forschungsbedarf. Eine detailliertere Erläuterung ist den entsprechenden Berichtsteilen zu entnehmen.

Zustandserfassung Bauwerke: Der Themenkomplex beinhaltet eine Analyse der üblichen Prozesse in der Zustandserfassung von Bauwerken, Schutzbauten und Streckenabschnitten. Weiters die Konzeption sowie Datenherstellung mittels UAS und Auswertung der Inspektionen für eine Stahlbrücke und eine Stahlbetonbrücke, eine Schutzverbauung und ein Gebäude. Darüber hinaus der Entwicklung eines tragfähigen Konzeptes sowie Demonstration von Anwendungen für die Umsetzung der Erkenntnisse in Digitalisierung und Asset Management von ÖBB und ASFINAG. Aus Sicht von RISKMON sind leistungsfähige UAS und Sensorik in Kombination mit einer spezifischen Flugplanung und autonomer und automatisierter Erfassung, sowie entsprechende Algorithmen, die geeigneten Werkzeuge für die quantitative Erfassung von Bestands- und Zustandsdaten. Dies erlaubt künftig insgesamt bessere Zustandsprognosen sowie Einsparungen durch einen effizienten Einsatz von Maßnahmen im Lebenszyklus. Zu berücksichtigen sind bauwerksspezifische

sche Einschränkungen bei Zugänglichkeit und Einsehbarkeit sowie fehlende handnahe Aufnahmetechniken. Eine erfolgreiche Umsetzung erfordert daher eine schrittweise Implementierung und eine Rückkoppelung der einzelnen Ergebnisse, um eine koordinierte Weiterentwicklung auf Basis der Erfahrungen zu ermöglichen. Neben den unmittelbar einsetzbaren Anwendungen werden allerdings auch notwendige Investitionen in diese Entwicklung mit Forschung zu Digitalisierung, BIM, Asset Management, LCC und Prozessmanagement sowie Ausbildung und Integration in die Unternehmensprozesse auf Basis einer entsprechenden Gesamtstrategie erforderlich sein. Eine der Herausforderungen wird dabei vermutlich die Weiterentwicklung bestehender Asset Management Systeme sein, da in diesen durch starke Abstraktion und Simplifizierung der Nutzen besserer Erfassungsdaten bis zur Entscheidung vielfach verloren gehen kann.

	BRÜCKENBAUWERKE		STAHLBAUTEN	SCHUTZVERBAUUNGEN, STÜTZWÄNDE, ANKERWÄNDE	GEBÄUDE
	RGB Thermografie Laserscan	Hyperspektralanalyse Georadar	RGB Thermografie Laserscan	RGB Thermografie Laserscan	RGB Thermografie Laserscan
Bedarf & Anforderungen	☀	☀	☀	☀	☀
Auswahl UAS & Sensorik	☀	☀	☀	☀	☀
Flugplanung	☀	☀	☀	☀	☀
Datenerfassung	☀	☀	☀	☀	☀
Datentransfer	☀	☀	☀	☀	☀
Datenintegration & Datenspeicherung	☀	☀	☀	☀	☀
Prozessierung	☀	☀	☀	☀	☀
Analyse & Auswertung	☀	☀	☀	☀	☀
Visualisierung	☀	☀	☀	☀	☀

Legende:

- ☀ unmittelbar umsetzbar, schrittweise Implementierung empfohlen
- schrittweise Entwicklung parallel zur Implementierung
- ergänzende Forschung notwendig

Abbildung 195: Zustandserfassung Bauwerke - Prozessschritte und Umsetzungsstand

Zusammen mit der Weiterentwicklung der quantitativen Zustandserfassung besteht die größte Chance im Bereich Bauwerke darin, als moderner Betreiber effiziente, transparente Entscheidungssysteme aufzubauen und dabei erhebliche Effizienzpotenziale zu heben. Neben einer Bewahrung des empirischen Erfahrungsschatzes der MitarbeiterInnen erlaubt dies auch den Einsatz von künstlicher Intelligenz und Vereinheitlichung in der Schadensdetektion. Weiters könnte dadurch eine Optimierung von Interventionsstrategien im Lebenszyklus der Bauwerke im Kontext der Streckenverfügbarkeit und Sicherheit ermöglicht werden. Die Entwicklung und Konkretisierung der im Zusammenhang mit RISKMON stehenden Teile der Digitalisierungsstrategie in Richtung Digitalisierung, BIM, Asset Management und LCC sowie Prozessmanagement erfordern

eine koordinierte Vorgehensweise und die Auswahl geeigneter interner und externer Experten sowie eine Budgetierung und Zeitplan für die Umsetzung. Aufgrund der Komplexität der Aufgabenstellungen bestehen die größten Risiken in einer mangelhaften Strategie und unvollständiger Umsetzung, wodurch trotz Investition weder die angestrebten Effizienzgewinne noch die notwendige Akzeptanz im Unternehmen erreicht werden könnten. Als wesentlich für den Erfolg wird daher die Installation eines internen Koordinators empfohlen, um in einem Gesamtkonzept die bereits umsetzbaren Anwendungen und deren Weiterentwicklung zu optimieren, sowie die notwendigen Initiativen wie ergänzende Forschungsaufgaben zu initiieren. Wesentlich wird auch sein, die Aufgabenbereiche im Asset Management Zyklus zu umfassenden und eine in Funktion und Zeitplan etappenweise Vorgehensweise zu finden.

Zustandserfassung Naturgefahren: Der Themenkomplex beinhaltet eine Analyse der üblichen Prozesse in der Erfassung von Naturgefahren, Auswertung von Gefahrenanlagen und Zustandserfassung von Schutzbauwerken sowie der Gefahrenminimierung und Abwehr. Weiters die Konzeption, Umsetzung und Auswertung der Inspektionen einer Schüttmure sowie von Lawinhängen mit Messung von Schneehöhe und Schneemächtigkeit sowie Lawinensprengung mittels UAS. Darüber hinaus der Entwicklung eines tragfähigen Konzeptes und Lebenszykluskostenansatzes für den Maßnahmenvergleich mit Demonstration von Anwendungen für die Umsetzung der Erkenntnisse in Digitalisierung und Naturgefahrenmanagement von ÖBB und ASFINAG. Weiters wurde ein Sensornetzwerk mit Ausbringung durch UAS für die Beobachtung von Lawinhängen mit Kostenschätzung konzipiert.

	SCHÜTTMURE	SCHNEEMÄCHTIGKEIT	SCHNEEPROFIL	LAWINENSPRENGUNG
	RGB Laserscan	Laserscan RGB	Schneeklinometer (vorliegende Konzeption)	
Bedarf & Anforderungen	☀	☀	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻
Auswahl UAS & Sensorik	☀	☀	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻
Flugplanung	☀	☀	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻
Datenerfassung	☀	☀	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻
Datentransfer	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻
Datenintegration & Datenspeicherung	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻
Prozessierung	☀	☀	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻
Analyse & Auswertung	☀	☀	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻
Visualisierung	☀	☀	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻	☀ 🧑🏻🧑🏻🧑🏻

Legende:

- ☀ unmittelbar umsetzbar, schrittweise Implementierung empfohlen
- 🧑🏻🧑🏻🧑🏻 schrittweise Entwicklung parallel zur Implementierung
- 🔬 ergänzende Forschung notwendig

Abbildung 196: Zustandserfassung Naturgefahren - Prozessschritte und Umsetzungsstand

Aus Sicht von RISKMON liegt die größte Stärke von UAS im Einsatz bei Naturgefahren in der quantitativen und qualitativen Erfassung des Zustands von Schutzanlagen und deren Veränderungen, sowie der Detektion von Schäden und Gefährdungslagen mit dem präventiven Einsatz zu Aufklärung und Gefahrenminimierung. Im Bereich der Naturgefahren sind die wesentlichen Algorithmen und Werkzeuge für eine Auswertung und Maßnahmenplanung sowie Optimierung weitgehend vorhanden. Auch in diesem Fall wird eine schrittweise koordinierte Implementierung empfohlen, um in weiterer Folge die Zusammenführung anlassbezogener empirischer Herangehensweisen mit einer ganzheitlichen Strategie steuern zu können. Weiters die Kombination hochauflösender Erfassungen mit Daten aus Sensoren vor Ort sowie geeigneten Softwaretools für die Datenauswertung und Optimierung von Streckenverfügbarkeit, Lebenszykluskosten und Sicherheit. Risiken bestehen in einer konservativen Grundhaltung im Anwendungsfeld sowie ereignisbedingt schwankenden Investitionen, was sowohl die Kommunikation als auch die Umsetzung vor Herausforderungen stellen könnte.

Zustandserfassung Strecke: Im Themenfeld geht es um eine Verbesserung der Bestands- und Zustandserfassung sowie Änderungsdetektion und Freigabe an Strecken der ÖBB und ASFINAG mit Einbindung in Bestandssysteme mit Einsatzempfehlung. Neben einer Analyse der bisherigen Herangehensweisen erfolgt dazu eine Erfassung und Auswertung mit Orthofoto sowie Analyse von erreichbaren Auflösungen und erkennbaren Änderungen für einen Streckenabschnitt von Straße (ASFINAG) und Schiene (ÖBB). Die Analysen zeigen, dass die Digitalisierung der Bestandsstrecken mit unterschiedlichen Werkzeugen (UAS, stationär/mobil terrestrisch), Sensoren (Laserscan, Photogrammetrie, Thermografie, Multispektral etc.) in unterschiedlicher Auflösung erfolgen können. Je nach Anwendergruppe (Betreiber, Nutzer, Behörden, Dienstleister) bestehen zudem unterschiedliche Anforderungen an Datenqualität, Datenaufbereitung und Datenbereitstellung.

Wie Analysen und internationale Entwicklungen zeigen, erfolgt die Digitalisierung des Streckennetzes am besten durch eine Kombination der verfügbaren Werkzeuge in Abstimmung mit den Anforderungen der Anwendergruppen und auf Basis eines ganzheitlichen Konzeptes. Eine Einbindung ausgesuchter Akteure aus Wissenschaft und Industrie in der Definition der Anforderungen sowie Entwicklung des Konzeptes wird zur Vermeidung von Fehlinvestitionen und Inselösungen empfohlen. Aus Sicht von RISKMON liegt die größte Stärke in der Streckeninspektion mit UAS in der schnellen, hochauflösenden Bestands- und Zustandserfassung sowie Änderungsdetektion und Freigabe an Strecken von ÖBB und ASFINAG sowie der Einbindung in BIM und GIS. Die Softwaretools, Algorithmen und Werkzeuge sind für die Erstellung von Punktwolken, texturierten 3D – Modellen und Luftbildern weitgehend vorhanden. Die größte Chance für den Betreiber liegt in der Nutzung aktueller Aufnahmen in der Digitalisierung, für die Entscheidungsfindung sowie Aufrechterhaltung der betrieblichen Verfügbarkeit. Neben der schrittweisen Implementierung ist die Entwicklung und Umsetzung einer ganzheitlichen Strategie sowie Auswahl bzw. Entwicklung geeigneter Softwaretools und Datenbanken mit den erforderlichen Funktionalitäten für Analyse und Darstellung zielführend. Zusammen mit einer entsprechenden Kommunikation sichern diese eine breite Akzeptanz sowie eine nachhaltige Realisierung des angestrebten Mehrwertes.

	AUTOBAHN	BAHNTRASSE
	RGB Thermografie Laserscan	RGB Thermografie Laserscan
Bedarf & Anforderungen		
Auswahl UAS & Sensorik		
Flugplanung		
Datenerfassung		
Datentransfer		
Datenintegration & Datenspeicherung		
Prozessierung		
Analyse & Auswertung		
Visualisierung		

Legende:

- unmittelbar umsetzbar, schrittweise Implementierung empfohlen
- schrittweise Entwicklung parallel zur Implementierung
- ergänzende Forschung notwendig

Abbildung 197: Zustandserfassung Strecke - Prozessschritte und Umsetzungsstand

Zustandserfassung Ereignisse: In dem Themenfeld geht es um die Aufklärung und Gefahrenabwehr im Fall außergewöhnlicher Ereignisse auf Bestandsstrecken, Standorten, Unfallbereichen mit Identifikation und Integration in die Gefahrenpläne. In der Anwendung erfolgte eine Aufklärung sowie Unterstützung bei einer Einsatzübung mit Recherche der Möglichkeiten einer Gefahrenabwehr. Die Digitalisierung der Bestandsstrecken sowie die Ausarbeitung entsprechender Einsatzpläne für kritische Anlagen unter Einsatz von UAS sowie zur Abwehr und Identifikation Unbefugter ist ein wesentlicher Baustein dafür. Je nach Anwendergruppe (Betrieb, Einsatzteam, Sicherheitsdienst) ergeben sich Unterschiede an die Anforderungen der eingesetzten Ausrüstung und Software.

Aus Sicht von RISKMON bietet der Einsatz mobiler Sensorik die Möglichkeit einer schnellen, gefahrlosen Aufklärung, eine rasche umfassende Beurteilbarkeit der Situation und Beweissicherung bei außergewöhnlichen Ereignissen. Für den effizienten Einsatz von UAS in proaktiver Aufklärung und Gefahrenabwehr bei außergewöhnlichen Ereignissen wird die Integration in die Gefahrenpläne mit entsprechender Ausstattung, Vernetzung mit bodenbasierten Sensoren und Leitständen sowie Training des Einsatzpersonals empfohlen. Die Erstellung und Umsetzung eines entsprechenden Konzeptes sowie Budgetierung für die Umsetzung ist Voraussetzung für eine schnelle, effiziente Anwendung im begrenzt vorhersehbaren Anlassfall.

	BAHN	AUTOBAHN	ABWEHR
	RGB Thermografie	RGB Thermografie	
Bedarf & Anforderungen	☀	☀	☀ 🔬
Auswahl UAS & Sensorik	☀	☀	☀ 🔬
Flugplanung	☀ 🚶	☀ 🚶	☀ 🔬
Datenerfassung	☀	☀	☀ 🔬
Datentransfer	☀ 🚶	☀ 🚶	☀ 🔬
Datenintegration & Datenspeicherung	☀ 🚶	☀ 🚶	☀ 🔬
Prozessierung	☀ 🚶	☀ 🚶	☀ 🔬
Analyse & Auswertung	☀ 🚶	☀ 🚶	☀ 🔬
Visualisierung	☀ 🚶	☀ 🚶	☀ 🔬

Legende:

- ☀ unmittelbar umsetzbar, schrittweise Implementierung empfohlen
- 🚶 schrittweise Entwicklung parallel zur Implementierung
- 🔬 ergänzende Forschung notwendig

Abbildung 198: Zustandserfassung Ereignisse - Prozessschritte und Umsetzung

Ausblick und aktuelle Entwicklungen: Aktuell ist die Thematik „Flüge außerhalb des Sichtbereiches“, Beyond Visual Line of Sight (BVLOS) Flüge, allgegenwärtig und viel diskutiert. BVLOS-Flüge sind derzeit international im zivilen Bereich, bis auf wenige Ausnahmen, nur einzelnen Unternehmen und Organisationen vorbehalten, die auch unter speziellen Voraussetzungen einen entsprechend komplexen Genehmigungs- bzw. Zulassungsprozess durchlaufen oder bereits absolviert haben. In diesem Zusammenhang steht das Thema Sicherheit für das Gerät, aber primär des Umfeldes und etwaiger betroffener Personen und Objekte im Vordergrund. Besonders wichtig auch das Zusammenspiel der bemannten und unbemannten Luftfahrt und deren Auswirkungen auf Anforderungen zur Erhöhung der Sicherheit.

Die seit 2019 geltenden neuen EU-Vorschriften zum Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen und, nur beispielsweise die Thematik SORA (Strategic Operations Risk Assessment) sowie U-Space (Regelungen betreffend Lufträume) - liefern eine weitere legislative Basis für diesen Einsatzbereich. Allerdings geht das Thema BVLOS deutlich darüber hinaus. Im Fokus stehen beim autonomen und automatisierten Drohnenflug außerhalb des Sichtbereiches, die Themen Sense & Avoid, Detect and Avoid sowie Hinderniserkennung. Das heißt von zentraler Bedeutung hierbei:

Wie reagiert bzw. muss das UAS reagieren, wenn ungeplante Ereignisse oder Hindernisse auftauchen. Sensoren, die zum Teil auch beim autonomen Fahren, wie beispielsweise LIDAR, Radar etc., von Bedeutung sind, nehmen hiermit auch in der unbemannten Luftfahrt eine zentrale Rolle ein. Für einen Teil, der in RISKMON behandelten Anwendungen kann diese Entwicklung nach den ersten Phasen der schrittweisen Implementierung einen weiteren deutlichen Effizienzgewinn bedeuten.

Bewertung und Aussicht: Die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsprojektes RISKMON liegen in der umfassenden Analyse, Konzeption, Anwendung sowie Grundlagen für einen standardisierten Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugsystemen und Sensorik im Bereich der Verkehrsinfrastruktur. Neben einer Bestands- und Zustandserfassung mit Orthofotos, 3D-Modellen und 3D-Visualisierung, wurden die Möglichkeiten und Grenzen einer Detektion von Änderungen und Auffälligkeiten bis hin zur automatisierten Schadensdetektion mit modernen Algorithmen aufgezeigt. Weiters wurden die Einsatzmöglichkeiten berührungsloser Sensorik mit umfassenden Laborversuchen validiert und die praktische Anwendbarkeit anhand konkreter Anwendungsfälle untersucht. Für die Integration und Weiterentwicklung der Bestandssysteme wurden konkrete Empfehlungen zur effizienten Datenhaltung und Prozessierung von großen, heterogenen Geodaten ausgearbeitet. Weiters wurden bestehende Datenbanken so weiterentwickelt, dass eine nachhaltige Speicherung, Aufbereitung und Abfrage der Ergebnisse generell bzw. am Beispiel der Anwendungsfälle gezeigt werden kann. Aufbauend auf die verwendeten Softwaretools sowie der beispielhaften Integration in die Bestandssysteme der Betreiber wurden abschließend Empfehlungen zur Weiterentwicklung und Standardisierung im Asset Management von ÖBB und ASFINAG ausgearbeitet. Zusammenfassend empfehlen die im Forschungsprojekt RISKMON erarbeiteten Grundlagen, Konzepte und Anwendungen einen effizienten und hochprofessionellen Einsatz industrieller unbemannter Luftfahrzeugsysteme in die Arbeitsprozesse von Infrastrukturbetreibern. Vor dem Hintergrund der raschen technischen Entwicklungen und Anforderungen der Digitalisierung liegt damit auch eine Grundlage für die nächsten Schritte in der Umsetzung vor.

Wien, im November 2019

für das Projektteam RISKMON

10 Anhang

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Projektstruktur	6
Abbildung 2:	Projektzeitplan RISKMON	34
Abbildung 3:	Budgetübersicht RISKMON	35
Abbildung 4:	Stellung und Zusammenhänge zwischen Schlüsselbegriffen gemäß ISO 55.000, 55.001 und 55.002 im Asset Management	37
Abbildung 5:	Überblick Transport Infrastructure Asset Management Zyklus mit Integration moderner LCC – Entscheidungsinstrumente und Schwerpunkt im Forschungsprojekt RISKMON	41
Abbildung 6:	Arten der Zustandserfassung sowie Intervalle von Überwachung, Kontrolle und Prüfung der (Brücken-)Bauwerke	43
Abbildung 7:	Instrumente der baulichen Zustandserfassung und Methodik der Zustandsbeurteilung von Schutzbauwerken (aus SUDA, J. 2013)	46
Abbildung 8:	Übersicht Situationsbeurteilung der Schneelage für Neuschnee, Tribschnee, Altschnee, Nassschnee und Gleitschnee in Bezug auf die Lawinengefahr	49
Abbildung 9:	Übersicht Monitoring und Erfassung Naturgefahren am Beispiel eines Lawinenhangs mit EAWS – Gefährdungsskala und Aufzeichnungen einer typischen Messstation	49
Abbildung 10:	Ausgewählte UAV-Typen beispielhaft	53
Abbildung 11:	Klassen von uLFZ in Österreich (eigene Grafik)	55
Abbildung 12:	Gängige Sensoren in UAV-Systemen (keine relativen Größenverhältnisse)	60
Abbildung 13:	Image Matching Feature in mehreren Bildern	68
Abbildung 14:	Schritte von der Datenaufnahme bis zur Visualisierung	71
Abbildung 15:	Datenverarbeitung	72
Abbildung 16:	Datenbankkonzept	73
Abbildung 17:	Übersicht Suchergebnis (Lieferung: B2 Italienschleife – Bogen 34)	74
Abbildung 18:	Metadatenmanagement Lieferungsübersicht (Lieferung: B2 Italienschleife - Orthoplane und Inspektion Bogen Nr. 34)	74
Abbildung 19:	GTI-Unterverzeichnis (Lieferung: B2 Italienschleife - Orthoplane & Inspektion Bogen Nr. 34)	75
Abbildung 20:	GTI Meta-Informationen (Lieferung: B2 Italienschleife - Orthoplane und Inspektion Bogen Nr. 34)	75
Abbildung 21:	Ansicht Eingabe bzw. Erfassungsdaten (Bild: DSC01090.jpg)	76
Abbildung 22:	INF-Unterverzeichnis (Lieferung: B2 Italienschleife - Orthoplane Inspektion Bogen 34)	76
Abbildung 23:	PCC Unterverzeichnis (Lieferung: B2 Italienschleife - Orthoplane Inspektion Bogen 34)	77
Abbildung 24:	TIN Unterverzeichnis (Lieferung: B2 Italienschleife - Orthoplane Inspektion Bogen 34)	77
Abbildung 25:	Typische Videoformate, Datenformate und Dateigrößen sowie Darstellung des Zusammenhangs von Bildabstand, Auflösung und Erfassungsaufwand als Basis der Photogrammetrie	80
Abbildung 26:	BLADESCAPE Flugplanungs-Methode	83
Abbildung 27:	Beispiel Flugplanung einer fotogrammetrischen Erfassung	84
Abbildung 28:	Airborne – Laserscans liefern Punktwolken mit mittlerer Auflösung und sehr hoher Lagegenauigkeit – die Datenverarbeitung und Bereinigung erfolgt mit Herstellersoftware (z.B. RIEGL)	88
Abbildung 29:	Terrestrial Laserscans bei 60 km/h erreichen höhere Auflösungen (1mm quer, 0,1 mm vertikal bei 0,25 mm Standardabweichung) mit automatischer Auswertung (PAVEMETRICS)	88
Abbildung 30:	Aufnahmen bei 60 km/h mit hohen Auflösungen und automatischer Auswertung der Schadensmerkmale erlauben kostengünstigen Einsatz und häufige Erfassungen (PAVEMETRICS)	89
Abbildung 31:	Einfache Viewer für Punktwolken mit Zusatzfunktionen wie Höhenlage, Differenz, Ansichten (Lageplan, Schnitte), Messung von Längen, Flächen und Volumen sowie Höhenprofilen und Schichtenlinien gibt es als Freeware mit Source-Code (z.B. www.potree.org)	89
Abbildung 32:	N1 Schüttmure - 3D Rekonstruktion Fotogrammetrie (PCC: Dense Pointcloud)	90

Abbildung 33:	N1 Schüttmure - 3D Rekonstruktion Fotogrammetrie (TIN)	92
Abbildung 34:	Anwendung N3 h1 - 3D Rekonstruktion Grid niedrig (DOP - Übersicht)	93
Abbildung 35:	Anwendung N3 h1 - 3D Rekonstruktion Grid niedrig (DOP - Detailausschnitt)	94
Abbildung 36:	Anwendung N3 h1 - 3D Rekonstruktion Grid niedrig (DOP) – Via Geolokalisierung auf Karte verortet (Visualisierung: Pix4DMapper – Viewer)	94
Abbildung 37:	B4 Graz - Raaba – Hochauflösende Prozessierung und 3D – Mesh (oben) sowie um den Faktor 20 reduziertes 3D – Mesh (unten) jeweils ohne Textur (Datenreduktion Faktor 10-20)	97
Abbildung 38:	Pix4DModeller (Ansicht Big Data - Überblick 36 km Autobahn - Dezimeter)	98
Abbildung 39:	Pix4DModeller (B2 Italienschleife - Orthoplane und Inspektion Bogen 34) inklusive einer Annotation aus RISKMON (Ansicht: Mesh - Submillimeter)	98
Abbildung 40:	Konzeptuelle Erstellung eines Quadrees	101
Abbildung 41:	Fotogrammetrische Erfassung (Italienschleife - Bogen 34)	102
Abbildung 42:	Punktwolkenberechnung aus Fotogrammetrie (Italienschleife - Bogen 34 unbereinigt)	102
Abbildung 43:	Punktwolke - Nahansicht eines Risses in Bogen 34 (Italienschleife - Bogen 34)	103
Abbildung 44:	Nahansicht des Risses im texturiertem 3D Modell (Italienschleife - Bogen 34)	103
Abbildung 45:	Photogrammetrie von a) Wireframe (TIN-Netz) zu b) meshed 3D – Objekt (Solid) bis zu c) texturiertem 3D – Modell im Vergleich zu d) Originalaufnahme (Beispiel Pont St. Ursanne)	104
Abbildung 46:	Photogrammetrie mit a) Orthofoto auf Basis des 3D – Mesh (texturiert) sowie b) 2,5 D – Höhenmodell auf Basis des 3D – Mesh (Beispiel Pont St. Ursanne)	104
Abbildung 47:	Datenmanagement funktionale Architektur	106
Abbildung 48:	ASFINAG IST-Bestandssystem	112
Abbildung 49:	ÖBB Infrastruktur AG - IST-Bestandssystem	113
Abbildung 50:	Generelles Konzept für die Weiterentwicklung des Asset Management mit Integration hochauflösender Erfassungsdaten in das Asset Management in RISKMON	114
Abbildung 51:	Generelles Konzept für die erforderlichen Eingangsdaten sowie die Schadenserkennung und Validierung der Detektionsraten mit Algorithmen in RISKMON	115
Abbildung 52:	Überblick verwendete Algorithmen in der Bildverarbeitung bzw. Schadensdetektion mit erreichten Detektionsraten für Risse mit Quellenverweisen (MOHAN, A. et al. 2017)	116
Abbildung 53:	Ergebnisse der verwendeten/entwickelten Algorithmen zur Detektion von Risssschäden am Beispiel von Bildausschnitten eines Betonpfeilers sowie einer Asphaltdecke in RISKMON	116
Abbildung 54:	Ergebnisse der Analyse großer Datenmengen in der Detektion von Risssschäden am Beispiel eines gesamten Brückenpfeilers der ASFINAG aus Beton in RISKMON	117
Abbildung 55:	ASFINAG – Empfehlung Bestandssysteme	117
Abbildung 56:	ÖBB – Empfehlung Bestandssysteme	118
Abbildung 57:	Konzipiertes System für den Zugang zu Ergebnisdaten aus RISKMON	119
Abbildung 58:	Grundriss (alle Abmessungen in Meter) des Testkörpers mit den verschiedenen Schäden (Felder 1, 2 und 3 weisen Hohlstellen auf. In den Feldern 5, 6, und 9 soll die Delamination nachgewiesen werden. Die Felder 4, 7 und 8 weisen korrodierende Bewehrungsstäbe auf. Feldnummern gekennzeichnet mit „*“ bedeuten “Felder mit schlechter Nachbehandlung des Betons“)	122
Abbildung 59:	Querschnitt (alle Abmessungen in Meter) des Testkörpers mit den Schäden in unterschiedlichen Tiefenlagen samt Schadensart und Bezeichnung	122
Abbildung 60:	Sensoren, Arbeitsschritte und Zeitplan der Laborversuche (BOKU-IKI)	123
Abbildung 61:	Prinzip für die Detektion von Delamination (aus NEXCO-West 2014a)	126
Abbildung 62:	Thermografische Aufnahmen einer Brückenfläche mit Schadensdetektion und Schadensklassifizierung (aus NEXCO-West 2014a,b)	127
Abbildung 63:	Materialbestimmung mittels spektraler Signatur (aus SHABAN 2013)	128
Abbildung 64:	Bestimmung der Bewehrungslage mittels 3D – finite Zeitdifferenzmodellierung des Georadars (aus LACHOWICZ, J. et al. 2018)	129
Abbildung 65:	Grundriss und Ansicht der hergestellten Testkörper Nr. 1, 2 und 3 mit der Lage der Bohrungen und Temperatursensoren	131

Abbildung 66:	Grundriss und Ansicht des hergestellten Testkörpers Nr. 4 mit der Lage der Bohrungen und Temperatursensoren und Messaufbau (rechts unten)	132
Abbildung 67:	Geräteigenschaften FLIR E60bx	132
Abbildung 68:	Geräteigenschaften FLIR Vue Pro 640 R	133
Abbildung 69:	Darstellung der verschiedenen Messdurchgänge mit Erwärmung der Testkörper von vorne, von hinten, mit und ohne Wasser durchströmten Löchern	133
Abbildung 70:	Messaufbau im Labor	134
Abbildung 71:	Aufnahmen der Platte D5 nach Erhitzen im 10 min Takt	135
Abbildung 72:	Temperaturfelder der Platte D5 im Tagesverlauf unter Sonneneinstrahlung	136
Abbildung 73:	Detail 1 Italienschleife bei regnerischem Wetter zu verschiedenen Uhrzeiten	137
Abbildung 74:	Detail 2 Italienschleife bei sonnigem Wetter nach Regen zu verschiedenen Uhrzeiten	137
Abbildung 75:	Thermografieaufnahmen eines Details der Viaduktgasse um 10:00 und um 12:00	138
Abbildung 76:	GPR Live mit Rastervorlage zur Aufnahme der Betonplatten	138
Abbildung 77:	Betonprüfkörper mit Rastersystem für die Aufnahmen der Betonplatten mit GPR Live	139
Abbildung 78:	Georadarmessung von Plattenoberseite der Platte 4 mit Bewehrungsstäben, der Platte 2 mit Hohlstellen (Mitte) und der Platte 5D mit Delamination (rechts) laut Abbildung 77	139
Abbildung 79:	Aufbau Hyperspektralkamera vom Institut für Holzforschung	140
Abbildung 80:	Spektrale Signaturen von Betonoberflächen ohne Chloridbeaufschlagung (blau), mit geringer Chloridkonzentration (rot) und mit hoher Chloridkonzentration (grün)	141
Abbildung 81:	Spektrale Signatur von karbonisiertem Beton (grau) und von intaktem Beton (violett)	142
Abbildung 82:	Oberflächenanalysen der modellierten Betonkörper, TK = 50°C; Umgebung, TU = 25°C, Bohrung, TB = 12°C; Bohrung, d=25mm	143
Abbildung 83:	Ermittlung der Detektionswahrscheinlichkeit (POD – Probability of Detection)	143
Abbildung 84:	POD – Probability of Detection der vier Bohrlöcher bei einer Umgebungstemperatur von 40°C, einer Betontemperatur von 50°C und einer Bohrlochtemperatur von 18°C in Abhängigkeit von der Beobachtungszeit	145
Abbildung 85:	Konzept für die mehrdimensionale systematische Zustandserfassung von Hangsicherungen mit bildgebenden Verfahren (Fotogrammetrie, Lasercan) und automatisierter Änderungsdetektion	154
Abbildung 86:	Schematische Darstellung eines typischen Lebenszyklus von Brückenanlagen im hochrangigen Straßennetz zusammen mit den erforderlichen Inspektions- und Prüfintervallen	154
Abbildung 87:	Mehrdimensionale systematische Zustandserfassung von Brücken mit Bauwerksgeometrie, Zustand und Deformation mit Überwachung, Kontrolle & Prüfung	155
Abbildung 88:	Übersicht Interessensgebiet Klammstein	161
Abbildung 89:	Eigentumsverhältnisse im Interessensgebiet (Auszug WebGIS der ÖBB vom 14.8.2018)	162
Abbildung 90:	Flugplanung Orthofoto Graz-Raaba	163
Abbildung 91:	Flugplanung Orthofoto	164
Abbildung 92:	Bildkoordinaten Inspektionsflug	165
Abbildung 93:	Inspektionsflüge Bildkoordinaten Murbrücke	166
Abbildung 94:	Aufnahmen vom Einsatz bei der Murbrücke	166
Abbildung 95:	Schutzverbauung Klammstein – Projektgebiet und Ausschnitt Brücke	167
Abbildung 96:	Schutzverbauung Klammstein – 3D - Modellüberblick und Ausschnitt Brücke	168
Abbildung 97:	Schutzverbauung Klammstein – 3D – Modell Nordhang mit Flugpfad (low, high)	168
Abbildung 98:	Schutzverbauung Klammstein – 3D – Modell Schneebrücke und Aufnahmen (high)	169
Abbildung 99:	Schutzverbauung Klammstein – Beispiel Schäden Verbauung (alt)	169
Abbildung 100:	Schutzverbauung Klammstein – Beispiel Schäden Verbauung (Dehnspirale, Korrosion)	170
Abbildung 101:	Schutzverbauung – Empfehlungen für Kontrolle, Inspektion, Prüfung (generell)	170
Abbildung 102:	ABM Graz Raaba– Übersicht sowie 3D – Ansicht (Google Maps)	171

Abbildung 103: ABM Graz Raaba– Orthofoto Untersuchungsgebiet (high)	172
Abbildung 104: Funktionsanalyse von Solarpanelen mit Thermografie/Python (github.com/cdeldon)	172
Abbildung 105: ABM Graz Raaba– Salzsilo Übersicht (high)	172
Abbildung 106: Salzsilo 3D - Modell (high)	173
Abbildung 107: ABM Graz Raaba– Salzsilo Detailvergleich 3D – Modell und Foto (high)	173
Abbildung 108: Italienschleife – Übersichtskarte (Google Maps)	175
Abbildung 109: Italienschleife – Orthofoto aus RISKMON mit Detailzoom (high)	175
Abbildung 110: Italienschleife – 3D Modell und Ansicht Bögen 31 - 35 (high)	176
Abbildung 111: Italienschleife – 3D Modell und Ansicht Bögen 34 mit Details (high)	176
Abbildung 112: Italienschleife – Beispiel Detailaufnahmen Stahlbrücke (vgl. Anhang)	177
Abbildung 113: Italienschleife – Beispiel Auswertung Differenzaufnahme Thermografie	177
Abbildung 114: Murbrücke Nord/Süd – Übersichtskarte und Ansichten (Google Maps)	178
Abbildung 115: Murbrücke Nord/Süd – Flugpfad und Orthoplanes RISKMON	179
Abbildung 116: Murbrücke Nord/Süd – Detailbilder aus RISKMON (siehe Prüfbericht im Anhang)	180
Abbildung 117: Beispiel für Fehleranalyse Murbrücke	180
Abbildung 118: Konzept der Erfassung von Naturgefahren am Beispiel einer Vermurung mit Erfassungsgebiet, mehrmaliger Aufzeichnungen und Differenzermittlung (Volumen)	192
Abbildung 119: Übersicht Konzept für die Bekämpfung von Naturgefahren am Beispiel eines Lawinenhangs mit konkreter Vorgehensweise und Szenarioanalyse als Basis für die SWOT - Beurteilung	192
Abbildung 120: Planung Flugrouten Nullmessung	196
Abbildung 121: Planung Flugrouten Vergleichsmessung Schüttmure	197
Abbildung 122: Impressionen vom Einsatz Schüttmure	197
Abbildung 123: Händische Kontrollmessung der Schneemächtigkeit mittels Messsonden	198
Abbildung 124: Impressionen zur Schneehöhenmessung am Hochkar u.a. mit Schneestangen	199
Abbildung 125: Übersichtsdarstellung zur Konzeption der technischen Ausführung zur Lawinensprengung	200
Abbildung 126: Impressionen der Teststellung Lawinensprengung	200
Abbildung 127: Grundlagen der Lawinensprengung mit Wirkradius, Gewicht und Sprenghöhe	201
Abbildung 128: Einsatzkonzept und Erfassung von Lawinensprengungen mittels UAV	201
Abbildung 129: N1 Schüttmure Imst – Übersicht Projektgebiet und 3D – Ansicht	202
Abbildung 130: N1 Schüttmure Imst – Flugpfad und 3D – Ansicht zu t_0	203
Abbildung 131: N1 Schüttmure Imst - 3D Rekonstruktion zu t_0 mit Ausschnitt 3D - Pointcloud	203
Abbildung 132: N1 Schüttmure Imst - 3D Rekonstruktion zu t_0 mit Ausschnitt 3D – Mesh texturiert	204
Abbildung 133: N1 Schüttmure Imst - 3D Rekonstruktion zu t_0 & t_1 mit Ausschnitten Orthofotos (Detail)	204
Abbildung 134: N1 Schüttmure Imst - 3D Rekonstruktion mit Differenz von t_0 zu t_1 (Pointcloud)	205
Abbildung 135: N1 Schüttmure Imst - Differenzprofil von t_0 zu t_1 (Schnitt auf Basis Pointcloud)	206
Abbildung 136: Schneeprofil Hochkar – Übersichtskarte und 3D - Ansicht	207
Abbildung 137: Schneeprofil Hochkar – Flugpfad und 3D – Ansicht Schneefeld zu t_0	207
Abbildung 138: Schneeprofil Hochkar – Orthofoto, 2,5D Orthofoto (Farbe) und Höhenprofil zu t_0	208
Abbildung 139: Schneeprofil Hochkar – TIN-Netz und Schneeprofile Differenz Erfassungen t_0 und t_1	209
Abbildung 140: Auswertung der Streckenunterbrechungen und Streckensperren durch Naturgefahren mit Anzahl und Dauer der Sperren infolge Eis/Lawinen/Verwehungen von 1990 – 2017 am Netz der ÖBB	210
Abbildung 141: Auswertung der räumlichen Verteilung von Streckenunterbrechungen infolge Eis/Lawinen/Verwehungen von 2013 – 2017 am Netz der ÖBB (keine präventiven Sperren enthalten)	211
Abbildung 142: Zusammenfassung der Zuschläge zu den Betriebserschwerniskosten infolge geplanter und ungeplanter Streckenunterbrechungen an eingleisigen Strecken der ÖBB (Preise 2018)	212

Abbildung 143: Gemessene Schneehöhe an einer gewählten Messtation sowie Lawinewarnstufen 2016/17 sowie Beispiel Schneeprofil mit Zusammenhang gemessene Schneedichte nach Schneehöhe	213
Abbildung 144: Praktische Erfassung von Schneehöhe, Schneedichte und Schichtung mittels WedgeCutter, Snow Fork und Snow Tube/Sampler mit Vergleichsmessung und Validierung	213
Abbildung 145: Praktische Erfassung von Schneehöhe, Schneedichte und Schichtung über den Eindringwiderstand mittels Schneesonden Avatech Sp2 und MicroSnowPen	214
Abbildung 146: Praktische Verwendung und Häufigkeit der Verwendung von Systemen zur Erfassung und Monitoring und Bewertung der Schneelage in Europa (COST Action ES1404)	214
Abbildung 147: Erfassung der Schneehöhe durch fotogrammetrische Erfassung der Topographie ohne/mit Schneedecke mittels UAV und Validierung mittels Profilmessungen	215
Abbildung 148: Rückrechnung Schneeprofil mit Schneehöhe, Dichte und Schichtung mittels Simulation energetischer physikalischer Prozesse und von Wetteraufzeichnungen in SNOWPACK	215
Abbildung 149: Gegenüberstellung aktiver und passiver Lawinenschutzmaßnahmen für den Vergleich der Lebenszykluskosten der Szenarien als Basis von SWOT und LCC - Analyse	217
Abbildung 150: Systematischer Zusammenhang zwischen Neuschneemenge und Altschneedicke mit Abgangverteilung, Hangneigung und Schadensausmaß nach kumulativer Neuschneehöhe	218
Abbildung 151: Systematischer Zusammenhang zwischen Neuschneemenge und Altschneedicke mit Temperaturverlauf, Tauphasen sowie Schneedichteprofilen	219
Abbildung 152: Ermittlung der Anzahl erforderlicher Eingriffe aus statistischer Auswertung bzw. Simulation mit resultierenden jährlichen Kosten aktiver und passiver Lawinenschutzmaßnahmen	220
Abbildung 153: Kumulierten Neuschneemengen, Dauer von Schneefallereignissen sowie Häufigkeitsverteilung der Neuschneemenge an den verfügbaren Messstationen über 1000 m von 2004 – 2015 (AUT)*	221
Abbildung 154: Mittlere Schneemenge je Ereignis, Häufigkeitsverteilung der Ereignistage sowie Anzahl erforderlicher Eingriffe nach Neuschneehöhe für Messstationen über 1000 m von 2004 – 2015 (AUT)*	221
Abbildung 155: Ermittlung der Ereignistage und kumulierten Neuschneemengen aus der Generation korrelierter Zufallszahlen auf Basis der empirischen Wetterdaten	223
Abbildung 156: Bestimmung der seriellen Korrelation von Einzelereignissen und Simulation aufeinanderfolgender Einzelereignisse bzw. der jeweils resultierenden Ereignisdauern	223
Abbildung 157: Generierung der Neuschneemengen für Einzelereignisse und der monatspezifischen Neuschneehöhen auf Basis der empirischen monatlichen Verteilungsfunktion	224
Abbildung 158: Gegenüberstellung und Überprüfung der Simulationsergebnisse für die Ereignisdauer und kumulierten Neuschneemengen mit den Werten der Messstationen >1000 m von 2004 – 2015 (AUT)	224
Abbildung 159: Beispiel #1 – Beispielhafte Abschätzung der Ausfallkosten eines Streckenabschnittes von ÖBB und ASFINAG nach Lawinereignis, Jährlichkeit und Ausfallsdauer (Teil 1)	226
Abbildung 160: Beispiel #1 – Beispielhafter Vergleich der jährlichen Kosten von aktiven und passiven Schutzmaßnahmen sowie des Nutzens in Form vermiedener Ausfallkosten (Teil 2)	226
Abbildung 161: Beispiel #2 – Beispielhafte Abschätzung der Ausfallkosten des Streckenabschnittes Mallnitz-Tauerntunnel der ÖBB nach Lawinereignis, Jährlichkeit und Ausfallsdauer (Teil 1)	227
Abbildung 162: Beispiel #2 – Beispielhafter Vergleich der jährlichen Kosten von aktiven und passiven Schutzmaßnahmen sowie des Nutzens in Form vermiedener Ausfallkosten und Sachschäden (Teil 2)	227
Abbildung 163: Sensornetzwerk #1 – Konzeptentwurf, Skizzen und Anforderungen	228
Abbildung 164: Sensornetzwerk #2 – Aufbau, Sensorik, Messnetz und Ausbringung	229
Abbildung 165: Sensornetzwerk #3 – Elektronische Komponenten Schneeeinklinometer	229
Abbildung 166: Konzeption der Streckeninspektion mittels UAS und Differenzmapping mittels Orthofotos sowie eingebrachten Objekten mit (teil-)automatisierter Analyse	234
Abbildung 167: Konzeption der Streckeninspektion mittels UAS und Orthofotos bzw. Multispektralanalyse und Markierung des Handlungsbedarfes in ausgewählten Abschnitten mittels Checklisten	234
Abbildung 168: Flugplanung Orthofoto Rastplatz Pöchlarn	240
Abbildung 169: Flugplanung Detailaufnahme Gebäude Rastplatz Pöchlarn	240
Abbildung 170: Impressionen von der Datenerfassung Autobahnabschnitt A1 bei Pöchlarn	241
Abbildung 171: Flugplanung Orthofoto GZU St. Pölten	242
Abbildung 172: Flugplanung Erfassung Oberleitung GZU St. Pölten	242

Abbildung 173: Impressionen von der Güterzugsumfahrung St. Pölten	243
Abbildung 174: S1 Streckeninspektion Pöchlarn – Übersicht Projektgebiet	244
Abbildung 175: S1 Streckeninspektion Pöchlarn – 3D – Modell und Flugplan Rastplatz	244
Abbildung 176: S1 Streckeninspektion Pöchlarn – 3D - Modell Rastplatz mit Detailzoom (Mesh)	245
Abbildung 177: S1 Streckeninspektion Pöchlarn - Orthofoto Rastplatz Thermografie (diverse Tools)	246
Abbildung 178: S1 Streckeninspektion Pöchlarn - Kamerapfad für die fotogrammetrische Erfassung	246
Abbildung 179: S1 Streckeninspektion Pöchlarn – Ausschnitt verortete Aufnahmen mit Überlappung für die fotogrammetrische Rekonstruktion	246
Abbildung 180: S1 Streckeninspektion Pöchlarn – 3D – Modell nach Detailstufe (Prozessierung)	247
Abbildung 181: S1 Streckeninspektion Pöchlarn - Orthofoto Fahrbahnbegutachtung	247
Abbildung 182: S1 Streckeninspektion Pöchlarn – 3D Pointcloud Detailausschnitt Fahrbahnbegutachtung	247
Abbildung 183: S2 Streckeninspektion St. Pölten - Übersicht Projektgebiet	248
Abbildung 184: S2 Streckeninspektion St. Pölten – Auflösung Google Maps VS Orthofoto RISKMON	249
Abbildung 185: S2 Streckeninspektion St. Pölten – Ausschnitte Laserscan	249
Abbildung 186: Konzeption der Aufklärung und Gefahrenabwehr auf der Strecke mit Einsatz bei Störmeldungen, und Vergleich des Aufklärungsaufwandes mit Einsatzteam für die SWOT - Analyse	254
Abbildung 187: Konzeption der Aufklärung und Gefahrenabwehr bei stationärem Einsatz mit Erkennung, Alarmierung, UAVUAV-abwehr (aktiv/passiv) und Aufklärung	254
Abbildung 188: Übersicht Testanwendungen Einsatzübung Tunnel	258
Abbildung 189: Live-Bild für die Beobachtung der Verkehrsverlagerung, Tunnelübung	259
Abbildung 190: Teststellung zur Erfassung des Unfallgeschehens im Tunnel (Ausfall der Überwachungskameras symbolisiert)	259
Abbildung 191: Erfassung und Nachverfolgung eines auslaufenden Gefahrenstoffes (symbolisiert mittels Wasser) mittels RGB und Wärmebild	260
Abbildung 192: Erfassen und aufspüren vermisster Personen mittels Wärmebildkamera	260
Abbildung 193: Übersichtsplan Schartnerkogel-Tunnel	260
Abbildung 194: Impressionen der Einsatzübung Tunnel A9	261
Abbildung 195: Zustandserfassung Bauwerke - Prozessschritte und Umsetzungsstand	266
Abbildung 196: Zustandserfassung Naturgefahren - Prozessschritte und Umsetzungsstand	267
Abbildung 197: Zustandserfassung Strecke - Prozessschritte und Umsetzungsstand	269
Abbildung 198: Zustandserfassung Ereignisse - Prozessschritte und Umsetzung	270

10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kurzbeschreibung Lösungsansätze a) Inspektion ausgewählter Bauwerke	19
Tabelle 2:	Kurzbeschreibung Lösungsansätze b) Naturgefahren	20
Tabelle 3:	Kurzbeschreibung Lösungsansätze c) Streckeninspektion	21
Tabelle 4:	Kurzbeschreibung Lösungsansätze d) Außergewöhnliche Ereignisse	22
Tabelle 5:	Kurzbeschreibung Lösungsansätze d) Außergewöhnliche Ereignisse	23
Tabelle 6:	Übersicht Arbeitspakete in den Aufgabenbereichen a) bis d) in RISKMON	24
Tabelle 7:	Übersicht Meilensteine nach Aufgabenbereichen a) bis d) in RISKMON	24
Tabelle 8:	Arbeitspaketbeschreibung AP1 – Analyse Erfassungsmethoden	25
Tabelle 9:	Arbeitspaketbeschreibung AP2 – Einsatz Hochleistungsdrohnen & Datenanalyse	26
Tabelle 10:	Arbeitspaketbeschreibung AP3 – Umsetzung Anwendungsfälle	27
Tabelle 11:	Arbeitspaketbeschreibung AP4 – Evaluierung Ergebnisse und Konzeptoptimierung	28
Tabelle 12:	Arbeitspaketbeschreibung AP5 – Ergebnisaufbereitung, Vergleich und Berichtslegung	29
Tabelle 13:	Arbeitspaketbeschreibung AP6 – Projektmanagement	30
Tabelle 14:	Übersicht Arbeitspaket II - Analyse Erfassungsmethoden	32
Tabelle 15:	Übersichtarbeitspaket III - Konzeption Einsatz & Datenanalyse	32
Tabelle 16:	Übersicht Arbeitspakete IV - Umsetzung der Anwendungsfälle	33
Tabelle 17:	Übersicht Arbeitspakete V – Evaluierung der Ergebnisse & Konzeptoptimierung	33
Tabelle 18:	Übersicht Arbeitspakete VI – Ergebnisaufbereitung, Vergleich und Berichtslegung	34
Tabelle 19:	Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Brücken in Österreich (lt. RVS 13.03.11)	45
Tabelle 20:	Klassifizierung der Zustände von Brücken in Österreich (lt. RVS 13.03.11)	45
Tabelle 21:	Sonderprüfungen von Brücken in Österreich (lt. RVS 13.03.11)	45
Tabelle 22:	Klassifizierung der baulichen Zustandsstufen für Standard- und Schlüsselbauwerke	47
Tabelle 23:	Klassifizierung von Hochwassermeldungen und Warnstufen (DACH-Länder)	48
Tabelle 24:	Klassifizierung der Lawinengefahr - Europäischen Lawinengefahrenskala (EAWS)	48
Tabelle 25:	Übersicht ausgewählte UAV samt Spezifikationen	54
Tabelle 26:	Bewilligungskategorien von uLFZ in Österreich	55
Tabelle 27:	Übersicht willkürlich ausgewählte UAV–Sensoren Fotogrammetrie/Video	63
Tabelle 28:	Übersicht willkürlich ausgewählter UAV–Sensoren Thermografie	65
Tabelle 29:	Übersicht ausgewählte UAV – Sensoren Laserscanning (Lidar)	65
Tabelle 30:	Übersicht ausgewählte UAV – Sensoren Multispektralaufnahmen	66
Tabelle 31:	Mehrwert mobiler Sensorik im Asset Managements – mögliche Themenbereiche	69
Tabelle 32:	Datenformate #1 - Geometriedaten	79
Tabelle 33:	Datenformate #2 - Laserscandaten	79
Tabelle 34:	Datenformate #3 - Rasterdaten	80
Tabelle 35:	Auswahl Softwaretools Fotogrammetrie/LIDAR (3D – Modellierung)	86
Tabelle 36:	Bezugsellipsoid	99
Tabelle 37:	Vergleich der Datenbank Funktionen	109
Tabelle 38:	Datenbank Funktionen II	110
Tabelle 39:	Datenbank Funktionen III	110
Tabelle 40:	Visualisierung	110
Tabelle 41:	Prozessierung	110
Tabelle 42:	Übersicht nichtdestruktiver Erfassungsmethoden und Sensoren	124

Tabelle 43:	Übersicht der Laborversuche	130
Tabelle 44:	Detektionswahrscheinlichkeit Thermografie bei unterschiedlichen Temperaturen und Bohrlochtiefen nach einer Beobachtungszeit von 20 min	144
Tabelle 45:	Detektionswahrscheinlichkeit Thermografie bei unterschiedlichen Temperaturen und Bohrlochtiefen nach einer Beobachtungszeit von 10 min	144
Tabelle 46:	Anwendungsübersicht von Geräten zur zerstörungsfreien Detektion von Schäden und Eigenschaften von Beton auf Basis der Angaben von zerstörungsfreien Messgeräteanbietern und der Laboruntersuchungen der Universität für Bodenkultur (Auszug aus Tabelle im Anhang 10.5.5)	146
Tabelle 47:	Anwendungsübersicht von Geräten zur zerstörungsfreien Detektion von Schäden und Eigenschaften von Beton (Einschätzung BOKU) (Auszug aus Tabelle im Anhang 10.5.5)	146
Tabelle 48:	Übersichtstabelle Schadensmerkmale Beton und Sensoreignung für die Detektion	150
Tabelle 49:	Detailtabelle Schadensmerkmale Beton, Sensoren und Sensoreignung für die Detektion	151
Tabelle 50:	Ansprechpartner im Bereich Bauwerksinspektion	156
Tabelle 51:	Beispiel Expertenbefragung anhand von Stahlbrücken	158
Tabelle 52:	Ausschnitt aus der Auswertung der Expertenbefragung im Teilbereich Bauwerksinspektion	159
Tabelle 53:	Legende der Eigentumsverhältnisse	162
Tabelle 54:	Klassifizierung der Zustände von Brücken in Österreich (lt. RVS 13.03.11)	181
Tabelle 55:	Übersicht Brückenelemente - Schadenstypen und Erläuterung (HOFFMANN, M, 2018)	182
Tabelle 56:	SWOT – Analyse Einsatz mobiler Sensorik in der Zustandserfassung von Bauwerken	187
Tabelle 57:	Ansprechpartner im Teilbereich Naturgefahren	194
Tabelle 58:	Ausschnitt aus der Auswertung der Expertenbefragung im Teilbereich Naturgefahren	194
Tabelle 59:	Beschlossene Anwendungen im Bereich Naturgefahren	195
Tabelle 60:	Angepasste Anwendungen im Bereich Naturgefahren	195
Tabelle 61:	SWOT – Analyse Einsatz mobiler Sensorik bei Naturgefahren	230
Tabelle 62:	Terminübersicht im Teilbereich Streckeninspektion	235
Tabelle 63:	Ansprechpartner im Teilbereich Streckeninspektion	235
Tabelle 64:	Ausschnitt aus dem Ergebnis der Expertenbefragung für den Teilbereich Streckeninspektion	236
Tabelle 65:	Beschlossene Teststellungen im Teilbereich Streckeninspektion	238
Tabelle 66:	SWOT – Analyse Einsatz mobiler Sensorik in der Streckenerfassung	250
Tabelle 67:	Terminübersicht im Teilbereich Außergewöhnliche Ereignisse	255
Tabelle 68:	Ansprechpartner im Teilbereich Außergewöhnliche Ereignisse	255
Tabelle 69:	Ausschnitt aus Expertenbefragung im Teilbereich Außergewöhnliche Ereignisse	257
Tabelle 70:	Beschlossene Teststellungen im Teilbereich Außergewöhnliche Ereignisse	257
Tabelle 71:	SWOT – Analyse Einsatz mobiler Sensorik bei außergewöhnlichen Ereignissen	262

10.3 Literaturverzeichnis

- ACI (2013); *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*; Report of the American Concrete Institute ACI 228.2R-13; Farmington Hills; USA
- ALBRIGTSEN, A. (2016); *The application of unmanned aerial vehicles for snow avalanche search and rescue*; Master Thesis University of Norway
- ARASTOUNIA, M. (2015); *Automated Recognition of Railroad Infrastructure in Rural Areas from LIDAR Data*; in Remote Sensing 7(11) S14916-14938
- ARITA, J. & SASAKI, K. & ENDO, T. & YASUOKA, Y. (2001); *Assessment of Concrete Degradation with Hyperspectral Remote Sensing*. Presented at the 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Singapore, p. 5.
- ASFINAG (2012); *Erhaltungsstrategie*; Erstellt durch ein Projektteam der ASFINAG auf Basis einer Studie von HOFFMANN, M. und BLAB, R. (2012a) zum Erhaltungsmanagement der ASFINAG; Wien
- ASFINAG (2016); *Geschäftsbericht 2015*; Wien
- AVANZI, F. & BIANCHI, A. & CINA, A. & DeMICHELE, C. & MASCHIO, P. & PAGLIARI, D. & PASSONI, D. & PINTO, L. & PIRAS, M. & ROSSI, L. (2017); *Measuring the snowpack depth with Unmanned Aerial System fotogrammetry: comparison with manual probing and a 3D laser scanning over a sample plot*; The Cryosphere Discuss., doi:10.5194/tc-2017-57, 2017
- BENEDETTO, A., PAJEWSKI, L. (2015); *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*, Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. Springer International Publishing.
- BMF (2015; 2016); *Katastrophenfondsgesetz 1996*; 10. und 11. Bericht; Wien
- BMNT (2019); *Verwaltungsanweisung zur Technischen Richtlinie für die Wildbach- und Lawinverbauung*; Wien
- BMVI (2017); *Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten: RI-ERH-ING Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 RI-EBW-PRÜF*; Berlin
- BROOK, A. & BEN-DOR, E. (2018); *Reflectance spectroscopy as a tool to assess the quality of concrete in situ*;
- BUNGEY, J. H. & MILLARD, S.G. & GRANTHAM, M. G. (2006); *Testing of Concrete in Structures*; 4th Edition ISBN: 978-0-415-26301-6 Taylor & Francis; New York
- CONGER, S. M. & McCLUNG, D. M. (2009); *Comparison of density cutters for snow profile observations*; Journal of Glaciology, Vol. 55, No. 189, 2009
- EISEN, O. & WILHELMS, F. & STEINHAGE, D. & SCHWANDER, J. (2006); *Improved method to determine radio-echo sounding reflector depths from ice-core profiles of permittivity and conductivity*; Journal of Glaciology, Vol. 52, No. 177, 2006
- ELBERINK, E.O. (2013); *Rail track detection and modelling in mobile laser scanning data*; SPRS Annals of the Fotogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W2
- EZATY MOHD NASARUDIN, N. & SHAFRI, H. (2011); *Development and utilization of urban spectral library for remote sensing of urban environment*. <https://doi.org/10.4090/juee.2011.v5n1.044056>
- FITHRY SENIN, S. & HAMID, R. (2015); *Ground penetrating radar wave attenuation models for estimation of moisture and chloride content in concrete slab*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.156>
- GONG, J. et. al. (2012); *Mobile Terrestrial Laser Scanning for Highway Inventory Data Collection*; Int. Conference on Computing in Civil Engineering
- GRAVESEN, G. (2015); *Setting the Scene – Using Drones for Traffic Accident Reconstruction and Analysis*; Artikel in Waypoint – Drone insights & Inspiration
- HAGENMÜLLER, P. & HERWIJNEN, A. & PIELMEIER, C. & MARSHALL, H. P. (2018); *Evaluation of the snow penetrometer Avatech SP2*; Cold Regions Science and Technology 00 (2018) 1–18
- HAGENMÜLLER, P. & PILLOIX, T. & LEJEUNE, Y. (2016); *Inter-comparison of snow penetrometers (Ramsonde, Avatech SP2 and SnowMicroPen) in the framework of avalanche forecasting*; Proceedings, International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado
- HARRER, M. & GUNITZBERGER, R. & BAUMGARTNER, N. (2016); *Das Verkehrsmanagementsystem und die Verkehrsinformationsdienste der ASFINAG*; Beitrag in Verkehrsmanagementzentralen für Autobahnen - Aktuelle Entwicklungen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz; ISBN 978-3-658-22140-9 Springer Vieweg Verlag
- HASELBAUER, K. (2015); *Transport Infrastructure Asset Management - A holistic framework for transport infrastructure asset management applied for inland waterways*; ISBN: 978-3-901912-33-7 Dissertation an der TU Wien; Wien
- HEILIG, A. & SCHOBER, M. & SCHNEEBELI, M. & FELLIN, W. (2008); *Next level for snow pack monitoring in real-time using Ground-Penetrating Radar (GPR) technology*; International Snow Science Workshop;

- HIASA, S. (2016); *Investigation of infrared thermography for subsurface damage detection of concrete structures*; Dissertation (Open Access) University of Central Florida; USA
- HOFFMANN, M. & BLAB, R. (2012); *Das Erhaltungsmanagement der Straßeninfrastruktur der ASFINAG - Analyse und Bewertung der angewandten Methoden*; unveröffentlichter Forschungsbericht im Auftrag der ASFINAG; Wien; 159 S
- HOFFMANN, M. & STRAUSS, A. & DOLLESCHAL, T. & PELLER, G. & RIEDL, E. & WURGLITSCH, R. & AOURIK, N. (2017); *Forschungsprojekt RISKMON - Anlageninspektion und RISK-MONitoring mit Hochleistungsdrohnen (UAS/UAV)*; Antragsdokument der BIEGE – Partner BOKU, BLADESCAPE & IQSOFT; Wien
- HOFFMANN, M. (2018a); *Lebenszykuskosten der Straßeninfrastruktur – Optimierung von Investitionsstrategien und technischen Maßnahmen, Bau- und Betriebsweisen für Straßenanlagen in ihrem Lebenszyklus*; Habilitationsschrift eingereicht an der Technischen Universität Wien (in Publikation); Wien, 550 Seiten
- HOFFMANN, M. (2018b); *Long-term forecasting and assessment of road infrastructure investment needs based on standardized life cycles*; selected as “Top Paper” with recommendation for the ETRR Journal in the Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, 2018, Wien
- HOFFMANN, M. & HABERL, A. (2018); WAMS I+II – Wasserstraßen Management System; Endbericht zu den Forschungsprojekten von 2012-2015 bzw. 2016-2018 im Auftrag der viadonau; Wien; 82 S
- HUBBARD, S. & ZHANG, J. & MONTEIRO, P. & PETERSON, J. & RUBIN, Y. (2003); *Experimental Detection of Reinforcing Bar Corrosion Using Nondestructive Geophysical Techniques*. *Aci Materials Journal* 100, 501–510.
- HUGENSCHMIDT, J., MASTRANGELO, R. (2006); *GPR inspection of concrete bridges*. *Cement & Concrete Composites - CEMENT CONCRETE COMPOSITES* 28, 384–392.
- ILLMER, D. et al. (2015); *Machbarkeitsstudie Lawinenschutz – Liesgele-Lawine*; Studie im Auftrag der ÖBB-Infra; Fulpmes
- JANKŮ, M. & BŘEZINA, I. & GROŠEK, J. (2017); *Use of Infrared Thermography to Detect Defects on Concrete Bridges*. *Procedia Engineering, Structural and Physical Aspects of Construction Engineering* 190, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.308>
- JIA-CHONG, D. et al. (2007); *3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation*; in *Automation in Construction* 16 (2007) S657-663
- JISRAWI, A. (2014); *Drones Jammer; short paper and construction plan for a short-range drone jammer*; <http://jammers4u.com/drones-jammer>
- KAPFERER, J. (2016); *ÖBB trifft Vorsorge...; ÖBB – Kundendienst* in www.oebb.at
- KRYSIŃSKI, L. & SUDYKA, J. (2013); *GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks*. *Journal of Applied Geo-physics, Ground Penetrating Radar* 97, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.010>
- LACHOWICZ, J. & RUCKA, M. (2018). *3-D finite-difference time-domain modelling of ground penetrating radar for identification of rebars in complex reinforced concrete structures*; *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(4), 1228–1240. doi:10.1016/j.acme.2018.01.010
- LADICKY, L. & SAURER, O. & JEONG, S. & MANINCHEDDA, F. & POLLEFEYS, M. (2017); *From Point Clouds to Mesh Using Regression*; 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV); DOI: 10.1109/ICCV.2017.420
- LUBOWIECKA, I. et al. (2009); *Historic bridge modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics*; *Engineering Structures* 31 (2009) S2667-2676
- MALHOTRA, V. M. & CARINO, N. J. (2004); *Handbook on non-destructive testing of concrete*; 2nd Edition ISBN: 0-8031-2099-0 CRC Press; USA
- MANNSBERGER, G (2014); *Wildbach und Lawinenverbauung - Innovationen zum Schutz des Lebens - und Wirtschaftsraumes*; Vortrag bzw. LEBENSMINISTERIUM (2014); Schutz. Wirkung. Lebensraum; Broschüre; Wien
- MARCEAU, N.L. & VANGEEM, M.G., 2008. *Solar reflectance values for concrete*;
- MARGRETH, S. & BURKARD, A. & BURI, H. (2008); *Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung Teil B: Lawinen*; PLANAT, Schweiz
- MEHLHORN, G. & CURBACH, M. (2014); *Handbuch Brücken - Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten*; 3. Auflage ISBN 978-3-658-03339-2; Springer Vieweg; Wiesbaden
- MOHAN, A. & Poobal, S. (2017); *Crack detection using image processing: A critical review and analysis*; in *AEJ - Alexandria Engineering Journal*; DOI: 10.1016/j.aej.2017.01.020
- MONSERRAT, O. et al. (2008); *Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching*; *ISPRS Journal of Fotogrammetry & Remote Sensing* 63 S142–154
- MORIN, S. et al. (2018); *Application of physical snowpack models in support of operational avalanche hazard forecasting: a status report on current implementations and prospects for the future*; International snow science workshop proceedings 2018; Innsbruck

- NEXCO-WEST (2014a); *Comparison of Infrared Cameras for Concrete Bridge Deck Scanning: - Vol.1 Laboratory Test*; Research Report Washington; USA
- NEXCO-WEST (2014b); *Comparison of Infrared Cameras for Concrete Bridge Deck Scanning: - Vol.2 Field Test at Haymarket Bridge*; Research Report Washington; USA
- ÖBB-INFRASTRUKTUR (2017); *Regelwerk 06.02.01 Winterdienst – Instandhaltung, Maßnahmen bei Frost und Schnee*; Regelwerk Winterdienst des ÖBB Lawinenwarndienst, Wien
- PARK, H. S. et. al (2007); *A New Approach for Health Monitoring of Structures: Terrestrial Laser Scanning*; Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 22 S19–30
- PFEIFER, D. (1989); *Einführung in die Extremwertstatistik*; ISBN 978-3-519-02727-0 Springer Fachmedien Wiesbaden
- PIRAZZINI, R. et al. (2018); *European In-Situ Snow Measurements: Practices and Purposes*; The Sensors Journal; 2018
- PLEWES, L. A. & HUBBARD, B. (2001); *A review of the use of radio-echo sounding in glaciology*; in Progress in Physical Geography 25,2 (2001) pp. 203-236
- PROKSCH, M. & RUTTER, N. & FIERZ, C. & SCHNEEBELI, M. (2016); *Intercomparison of snow density measurements: bias, precision, and vertical resolution*; The Cryosphere, 10, 371–384, doi:10.5194/tc-10-371-2016
- PROKOP, A. et. al. (2013); *Determining avalanche modelling input parameters using terrestrial laser scanning technology*. International Snow Science Work-shop (ISSW), Oct 2013, Grenoble S770-774
- RECHNUNGSHOF (2014); *Gewährung von Landesbeiträgen zur Verhinderung und Beseitigung katastrophengebender Schäden*; Bericht Bund 2014/13; S
- REDPATH, A.N.T. & SIRGUEY, P. & CULLEN, N. J. (2018); *Repeat mapping of snow depth across an alpine catchment with RPAS photogrammetry*; The Cryosphere, 12, 3477–3497, 2018; doi.org/10.5194/tc-12-3477-2018
- RUDOLF-MIKLAU, F. & SAUERMOSE, S. (2011); *Handbuch Technischer Lawinenschutz*; ISBN 978-3-433-02947-3 Verlag Ernst & Sohn; Berlin
- RUDOLF-MIKLAU, F. & SAUERMOSE, S. & MEARS, A.I. (2015); *The Technical Avalanche Protection Handbook*; ISBN: 978-3-433-03034-9 Verlag Ernst & Sohn; Berlin
- SCHWEIZER, J. & WIESINGER, T. (2001); *Snow profile interpretation for stability evaluation*; Cold Regions Science and Technology 33 Ž2001. 179–188
- SHABAN, A. (2013); *Determination of Concrete Properties Using Hyperspectral Imaging Technology: A Review*. Science Journal of Civil Engineering & Architecture 11.
- SINABELL, F. & PENNERSTORFER, D. & LACKNER, S. (2016); *Eine volkswirtschaftliche Analyse der Wildbach- und Lawinenverbauung in Österreich Die Bereitstellung von Schutzgütern bisher und der künftige Bedarf*; Monographie 2016/159-2/S/WIFO-Projektnummer: 2214 Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung WIFO; Wien
- SKACH, K. & PAUSCH, N. (2011); *Notfallmanagement bei Infrastrukturbetreibern*; Vortragmanuskript; Wien
- SKOLAUT, C. et. al. (2014); *Stand des Wissens über die Anwendung der künstlichen Lawinenauslösung in Österreich*; Alpine Space Project START_it_up von SKOLAUT und BMLFUW; Wien
- SUDA, J. (2013); *Permanenter technischer Lawinenschutz - Handbuch zur Durchführung einer Bauwerkskontrolle*; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Wien
- SUDA, J. (2015); *Das Erhaltungskonzept für Naturgefahrenschutzbauwerke (Wildbach, Lawine, Steinschlag) nach ONR 24800-Serie*; Vortragsunterlagen zu Schutzsysteme gegen Naturgefahren - dauerhaft fit durch Systems Engineering?; München
- TALEB, N.N. (2010); *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*; ISBN 10: 0141906200
- TSAI, Y. & Chatterjee, A. (2017); *Comprehensive, Quantitative Crack Detection Algorithm Performance Evaluation System*; Journal of Computing in Civil Engineering 31(5), DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000696
- VAGHEFI, K. & de MELO SILVA, H.A. & HARRIS, D. & AHLBORN, M. (2011); *Application of Thermal IR Imagery for Concrete Bridge Inspection*; PCI National Bridge Conference, Salt Lake City, USA
- VEIT, P- (1999); *Rechenmodell zur wirtschaftlichen Bewertung von Strategien im Bereich Fahrweg*; Habilitation, Graz
- WEVER, N. & VERA-VALERO, V. & TECHEL, F. (2018); *Coupled snow cover and avalanche dynamics simulations to evaluate wet snow avalanche activity*; Journal of Geophysical Research F: Earth Surface, 123, 1772-1796; doi.org/10.1029/2017JF004515
- ZHANG, T. & SU, H. & WANG, K. (2017); *Comparison of Snow Density Measurements Using Different Equipment*; Presentation, Colorado, USA
- ZHANG, A. et al. (2018); *Deep Learning–Based Fully Automated Pavement Crack Detection on 3D Asphalt Surfaces with an Improved CrackNet*; Journal of Computing in Civil Engineering 32(5) DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000775

10.4 Materialien

10.5 Laborversuche - Ergebnisse und Protokolle

10.5.1 Versuchsprogramm I – Protokoll

10.5.2 Versuchsprogramm II – Protokoll

10.5.3 Georadar – Protokoll

10.5.4 Hyperspektralauswertungen – Chlorid und Karbonatisierung

10.5.5 Anwendung zerstörungsfreie Untersuchungen Betontragwerke

10.5.6 Übersichtstabelle Laborergebnisse